

**Optimierung von FLM-Bauteilen durch chemische
Nachbearbeitung sowie deren Einsatz in der Galvanik**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Oliver Baier
aus
Düsseldorf

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Januar 2016

Danksagung

Die Erarbeitung der Inhalte der vorliegenden Dissertation erfolgte während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen. Besonderer Dank für die Förderung und die Unterstützung gilt daher insbesondere dem Leiter des Lehrstuhls Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, sowie Dr.-Ing. Jan T. Sehr, dem akademischen Rat des Lehrstuhls. Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern des Lehrstuhls, besonders Herrn Dipl.-Ing. Karlheinz P.J. Hoeren für die konstruktive Büronachbarschaft.

Für die gute Zusammenarbeit während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter danke ich zudem dem Lehrstuhl Rechnereinsatz in der Konstruktion sowie dessen Inhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler für die Übernahme des Koreferats.

Ebenfalls möchte ich meine langjährigen Projektpartner nennen. Danke an das Zentrum für Brennstoffzellentechnik, insbesondere an Herrn Mounir Kouachi sowie an die Firma Galvano-T GmbH. Dabei gilt mein besonderer Dank Herrn Michael Busch, der in unzähligen konstruktiven Treffen und Telefonaten immer für neue Ideen zu haben war und diese mit Rat und Tat unterstützt hat. Für die Hilfestellung bei der Durchführung von Simulationen danke ich Herrn Dipl.-Ing. David Schäfer des Fachgebietes Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik (ATE) der Universität Duisburg-Essen.

Für die Unterstützung möchte ich meinen studentischen Hilfskräften sowie den Bearbeitern von Abschlussarbeiten danken. Besonders zu erwähnen sind dabei die Herren Simon Giese, Roland Hungreder, Maximilian Kalesse, Ivan Masalev und Martin Tewiele.

Zu guter Letzt der größte Dank an meine Familie. Ohne Euch wäre das hier nicht möglich gewesen.

Julia, danke für Alles!

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Additive Fertigungsverfahren.....	3
2.1.1	Begriffe und Definitionen	7
2.1.2	Fused Layer Modeling (FLM)	9
2.2	Galvanik.....	15
2.2.1	Verfahrensprinzip	16
2.2.2	Prozessbeeinflussende Effekte	18
3	Optimierung von FLM-Bauteilen.....	22
3.1	Stand der Technik	22
3.1.1	Prozessoptimierung	22
3.1.2	Bauteil Finishing	23
3.2	Systematik der Bauteiloptimierung	25
3.2.1	Qualitätsmerkmale eines Bauteils	26
3.2.2	Vorgehensweise der Versuche	26
3.2.3	Einflüsse auf die Versuchsergebnisse	28
3.3	Chemikalienvorauswahl.....	29
3.3.1	Beständigkeit von Kunststoffen gegenüber Chemikalien	30
3.3.2	Betrachtung der Sicherheits- und Gesundheitsrisiken	32
3.3.3	Ausgewählte Einwirkmedien	33
3.4	Einfluss auf die Oberfläche.....	34
3.4.1	Bestimmung der Einwirkzeit	34
3.4.2	Rauheit.....	45
3.4.3	Farbwiedergabe	51
3.5	Einfluss auf die Form- und Maßhaltigkeit	58
3.5.1	Maßhaltigkeit in x-y-Ebene.....	58
3.5.2	Maßhaltigkeit in z-Richtung	60
3.5.3	Formhaltigkeit.....	62
3.6	Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften	67
3.6.1	Härtemessungen nach Shore D	67
3.6.2	Zugeigenschaften.....	71
3.6.3	Betrachtung der Eindringtiefe.....	78
3.6.4	Dichte	79
3.6.5	Gasdichtheit	82

3.7	Fazit der chemischen Bauteilnachbehandlung	84
4	FLM-Kerne zur galvanischen Abscheidung	85
4.1	Auflösen des ABS Werkstoffes.....	86
4.1.1	Einfluss von Bewegung und Temperatur	87
4.1.2	Einfluss des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses	90
4.1.3	Einfluss von Farbstoffen auf die Auflösengeschwindigkeit	92
4.1.4	Einfluss der chemischen Nachbearbeitung	95
4.1.5	Einfluss des verwendeten Supportmaterials	97
4.2	Oberflächenqualität der galvanischen Abscheidung	98
4.3	Herstellung von FLM-Kernen.....	99
4.4	Applikationsbeispiel	102
4.5	Recycling	104
5	FLM-Galvanikblenden	106
5.1	Probleme unbehandelter FLM-Blenden.....	106
5.1.1	Detailgetreue Abscheidung an FLM-Bauteilen.....	107
5.1.2	Undichtheit der FLM-Bauteilstruktur.....	107
5.1.3	Passung der unebenen Oberflächenstruktur	108
5.2	Auslegung der Blendengeometrie	108
5.2.1	Auswirkung der Blenden auf die Stromdichteverteilung.....	112
5.2.2	Beeinflussung der Konvektion durch Blenden- und Bauteilgeometrie	113
5.3	Applikation der Galvanoformung auf Kupfer-Wachsbasis	117
5.3.1	Multi-Jet Modeling (MJM).....	118
5.3.2	Grundlagen der Verfahrenskombination	118
5.3.3	Anpassung des MJM.....	120
5.3.4	Haftungsproblematik	121
5.3.5	Galvanik der Kupfer-Wachsmodelle.....	122
5.3.6	Einsatz der FLM-Blenden.....	125
5.3.7	Anwendungsbeispiele in der Brennstoffzellentechnik	125
6	Zusammenfassung	131
7	Literaturverzeichnis	133
8	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	154
8.1	Abbildungen.....	154
8.2	Tabellen.....	157
9	Anhang	159
	Lebenslauf	162

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

3D	Dreidimensional
A/V-Verhältnis	Verhältnis von Oberfläche zu Volumen
ABS	Acrylnitril Butadien Styrol
AM	Additive Manufacturing
AMF	Additive Manufacturing Format/File
aq	aqueous, wässrig, in Wasser gelöst
ASTM	American Society for Testing and Materials
BASS	Break Away Support System
BST	Breakaway Support Technology
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMLS	Direktes Metall-Laser-Sintern
dpi	dots per inch (Punkte pro Zoll)
EEPROM	Electrically erasable programmable ROM
EN	Europäische Norm
FLM	Fused Layer Modeling
GESTIS	Gefahrstoffinformationssystem
ISO	Internationale Organisation für Normung
ISO TC	ISO Technical Committee
MAV	Micro Air Vehicles
Mio.	Millionen
MJM	Multi-Jet Modeling
Mrd.	Milliarden
PC	Polycarbonat
PLA	Polyactide
PSDO	Partner Standards Development Organization
R-Sätze	Risiko-Sätze
REM	Rasterelektronenmikroskop
RFID	Radio Frequency Identification
RGB	Rot-Grün-Blau
RM	Rapid Manufacturing
ROM	Read only memory
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
s	solid, fest (Aggregatzustand)
S-Sätze	Sicherheitsratschläge

SAN	Styrol Acrylnitril Copolymerisat
SLM	Selektive-Laser-Melting
SST	Soluble Support Technology
STL	Standard Triangulation Language
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WW	WaterWorks

Formelzeichen

a^*	Rot-Grün-Buntheit (CIELAB-Koordinate)
b^*	Gelb-Blau-Buntheit (CIELAB-Koordinate)
b_1	Breite an den Enden (Zugstab) [mm]
b_2	Breite des engen Teils (Zugstab) [mm]
Cu	Kupfer
Cu^{2+}	Kupferion, zweifach positiv geladen
CuSO_4	Kupfersalz
ΔE^*_{ab}	CIELAB-Farbabstand
e^+	Positron
E_t	Zugmodul [N/mm^2]
F	Faraday-Konstante [C/mol]
h	bevorzugte Dicke (Zugstab) [mm]
ΔH_m	Verdampfungsenthalpie [J/mol]
I	elektrische Stromstärke [A]
J	vektorielle Stromdichte [A/m^2]
L	Anfangslänge der Klemmen beim Zugversuch [mm]
L^*	CIELAB Helligkeit (CIELAB-Koordinate)
L_0	Messlänge beim Zugversuch [mm]
l_1	Länge des engen parallelen Teil (Zugstab) [mm]
l_2	Entfernung zwischen breiten parallelen Seiten (Zugstab) [mm]
l_3	Gesamtlänge (Zugstab) [mm]
In	Gesamtmessstrecke bei Rauheitsmessung [mm]
Ir	Einzelmessstrecke bei Rauheitsmessung [mm]
It	Taststrecke bei Rauheitsmessung mit Vor- und Nachlauf [mm]
M_{molar}	molare Masse des Schichtmaterials [kg/mol]
Q_{el}	transportierte Ladung [As]
r	Radius [mm]
Ra	arithmetischer Mittenrauwert [μm]
R_m	Zugfestigkeit [N/mm^2]
$R_{p0,2}$	0,2-%-Dehngrenze

r_{tip}	maximaler Tastspitzradius bei der Rauheitsmessung [μm]
R_z	gemittelte Rautiefe [μm]
S	Schichtstärke [μm]
\dot{s}	galvanische Abscheidungsrate [$\Delta\text{m/t}$]
SO_4^{2-}	Sulfatanion
t	Zeit
V_m	Molvolumen [m^3/mol]
z	Ladungszahl
δ	Löslichkeitsparameter (Hildebrand) [$\text{MPa}^{1/2}$]
δ_D	dispersiver Löslichkeitsparameter [$\text{MPa}^{1/2}$]
δ_H	wasserstoffbrückenbindender Löslichkeitsparameter [$\text{MPa}^{1/2}$]
δ_P	polarer Löslichkeitsparameter [$\text{MPa}^{1/2}$]
ε	notwendige Energie zur Überführung des Moleküls aus der kondensierten Phase ins Vakuum [J/mol]
ε_B	Dehnung bei Bruchspannung [%]
ε_M	Dehnung bei Zugfestigkeit [%]
λ_c	Grenzwellenlänge für Hochpassfilterung [mm]
λ_s	Grenzwellenlänge für Tiefpassfilterung [mm]
σ_B	Bruchspannung [MPa]
σ_M	Zugfestigkeit [MPa]

Einheiten

A	Ampere
C	Coulomb
g	Gramm
h	Stunden
HV	Vickershärte
J	Joule
kg	Kilogramm
K	Kelvin
l	Liter
m	Meter
m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
mbar	Millibar
min^{-1}	Umdrehung pro Minute
mm^2	Quadratmillimeter
mm^3	Kubikmillimeter
mol	Stoffmenge

MPa	Megapascal
MS	Megasiemens
N	Newton
s	Sekunde
S	Siemens
V	Volt
W	Watt
°C	Grad Celsius
%r.H.	Prozent relative Luftfeuchte
µm	Mikrometer
€	Euro
\$	Dollar

1 Einleitung und Zielsetzung

Seit der Entwicklung des ersten additiven Fertigungsverfahrens sind inzwischen nahezu 30 Jahre vergangen. Diese mittlerweile in einigen Bereichen der Industrie angekommene Art der Fertigung erfolgt, im Gegensatz zur konventionellen Herstellung, durch den schichtweisen Aufbau eines Bauteils. Eines dieser Verfahren ist das Fused Layer Modeling, kurz FLM, welches einen drahtförmigen, thermoplastischen Kunststoff mithilfe einer Düse schichtweise auf einer Bauplattform bzw. der zuvor hergestellten Schicht aufbaut. [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] Der Bekanntheitsgrad des in der Presse häufig als 3D-Druck bezeichneten Verfahrens stieg in den letzten Jahren besonders durch die Entwicklung preisgünstiger Anlagen für den Privatbereich. [8] [9]

Der schichtweise Aufbau führt zu einer Besonderheit aller additiven Fertigungsverfahren, dem sogenannten Treppenstufeneffekt. In Aufbaurichtung kann die Bauteilkontur nur durch das Aneinanderreihen der Schichten angenähert werden, wobei die Genauigkeit mit sinkender Schichtstärke steigt. Neben anderen Faktoren ist dieser Effekt wesentlich für eine im Verhältnis zu konventionell hergestellten Bauteilen schlechteren Oberfläche verantwortlich. An gewölbten und geneigten Flächen ist die Ausprägung dabei besonders hoch. [10] [11]

Wesentlicher Bestandteil der aktuellen Forschung ist aus diesem Grund die Verbesserung der Oberflächenqualität. Eine Möglichkeit der Umsetzung ist das tiefere Prozessverständnis und die Anpassung von Prozessparametern. So werden als wesentliche Einflussgrößen für die Oberflächenqualität die Orientierung des Bauteils im Bauraum, der Spuraufstand der aufgetragenen Materialstränge, die Schichtstärke des Materials und die Materialauftragsgeschwindigkeit ausgemacht. [12] [13] [14] [15] Eine weitere Möglichkeit der Bauteiloptimierung ist die Nacharbeit am Bauteil, auch Finishing genannt. Auch bei FLM-Bauteilen ist dabei zunächst jede Bearbeitungsform, wie beispielsweise eine mechanische Nachbearbeitung möglich. Aufgrund des hohen Aufwandes und der oft komplexen Geometrie additiv hergestellter Bauteile stoßen diese konventionellen Bearbeitungsmethoden jedoch schnell an ihre Grenzen und wirken den Vorteilen der schichtweisen Fertigung entgegen. So wurde beispielsweise von der Firma Stratasys die Möglichkeit des „Part Dippings“, also dem Eintauchen des Bauteils beschrieben. Die Unbeständigkeit des Kunststoffes gegenüber einigen Chemikalien wird bei diesem chemischen Nachbearbeitungsverfahren genutzt, um die Oberfläche zu lösen und einen Glättungseffekt zu erzielen. [16] [17] [18] Eine Untersuchung der Auswirkungen dieser Methode erfolgte bislang nur in sehr wenigen Studien. Diese beziehen sich lediglich auf einige Bauteileigenschaften und betrachten in der Regel identische Lösungsmittel. Die charakteristische Anisotropie von FLM-Bauteilen wird dabei kaum berücksichtigt. [19] [20] [21] [22] [23] [24]

So ist das Ziel dieser Arbeit, die Einflüsse dieser leicht durchführbaren, chemischen Nachbearbeitung von FLM-Bauteilen zu betrachten. Zunächst sind dazu nach der in Kapitel 2 durchgeführten, grundlegenden Beschreibung der auftretenden Verfahren in Kapitel 3 geeignete Chemikalien auf Basis der theoretischen Beständigkeit von ABS sowie durch Versuche zu ermitteln. Neben der Wirkung auf ABS spielen auch Sicherheitsaspekte gerade im Privatbereich eine entscheidende Rolle. Daher werden zur Beurteilung ebenfalls die Risiko- und Sicherheitssätze der Wirkmedien herangezogen. Nach der Ermittlung einer geeigneten Einwirkzeit erfolgt die Untersuchung und Interpretation der Auswirkungen auf den Kunststoff. Dabei wird auf unterschiedliche Ansprüche an ein Produkt eingegangen. Zunächst erfolgt die Betrachtung der Bauteiloberfläche, die ein wesentlicher Faktor für die Qualität additiv hergestellter Bauteile ist. Neben der Oberflächenrauheit sind entstehende Farbeinflüsse dabei von Bedeutung. Weitere Faktoren der Qualitätsbetrachtung sind die Form- und Maßhaltigkeit. Am Beispiel von Objektkanten und Außenmaßen werden diese beurteilt. Bei den mechanischen Eigenschaften liegt der Fokus auf den Zugeigenschaften. Zudem werden ebenfalls die Shore D Härte, die Dichte und die Gasdichtheit betrachtet, die ebenfalls durch die chemische Nachbehandlung variieren.

Nicht nur die Qualität von FLM-Bauteilen, auch neue Einsatzgebiete werden in dieser Arbeit in Kapitel 4 betrachtet. Die Unbeständigkeit gegenüber einigen Chemikalien soll dabei genutzt werden, um ein vollständiges Auflösen des Bauteils zu ermöglichen. So sind Bauteile als Urmodell für verschiedene Prozesse nutzbar. Exemplarisch wird dabei die Galvanoformung herangezogen. Die Einflüsse Bewegung und Temperatur des Lösemittels sowie die jeweiligen Farbstoffe des FLM-Materials werden dabei in Betracht gezogen. Auch die in Kapitel 3 hergeleitete Nachbearbeitung spielt bei der Auflösung der Bauteile eine wesentliche Rolle, sowohl für die Qualität der Bauteile als auch für das Auflöseverhalten.

Kapitel 5 befasst sich letztlich mit Blenden für die Galvanik, die eine definierte Abscheidung gewährleisten. Ermöglicht wird dies unter anderem durch die Oberflächenglättung. Auf Basis von Simulationen werden unterschiedliche Geometrien untersucht, um Einflüsse auf homogene Abscheidungen zu überprüfen und letztlich im Versuch zu bestätigen. Am Beispiel der Herstellung von Brennstoffzellenkomponenten erfolgt abschließend der Einsatz der beschriebenen Blenden.

Abgeschlossen wird die vorliegende Arbeit durch eine kurze Zusammenfassung in Kapitel 6. Ergänzend erfolgen Ausblicke für weitere Forschung bzw. Hinweise auf offene Fragestellungen.

2 Grundlagen

2.1 Additive Fertigungsverfahren

Bereits im Jahr 1986 erfolgte die Vergabe eines Patentes an Hull, welches das Verfahren Stereolithography beschreibt [1]. Auf dieser Basis begann im Jahr 1989 die kommerzielle Entwicklung der additiven Fertigungstechnik durch die Firma 3D Systems. [2] Heute beschreibt der Begriff additive Fertigung (englisch Additive Manufacturing, AM) alle schichtweise arbeitenden Technologien, die bei der Herstellung von dreidimensionalen Objekten zum Einsatz kommen. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Verfahren unter anderem durch das eingesetzte Material, den Bindungsmechanismus und die Aktivierungsenergie. [3] [4] [5] [6] [7] Die grundlegende Prozesskette der additiven Fertigung ist in Bild 2-1 dargestellt.

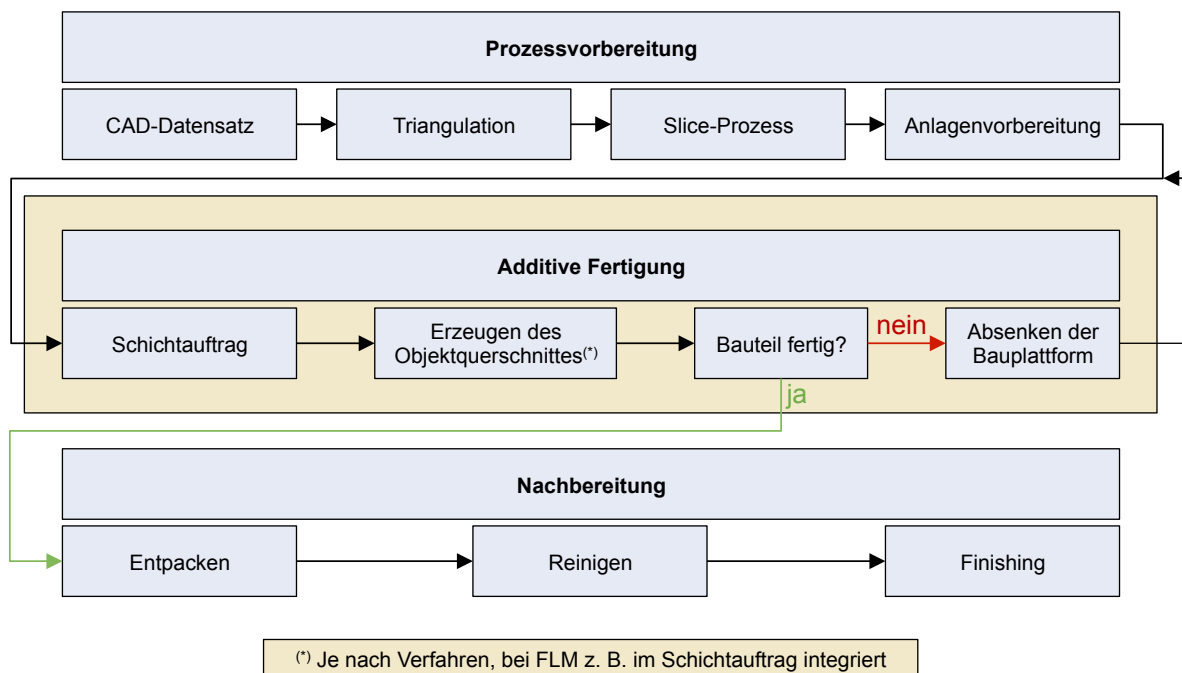


Bild 2-1: Prozesskette der additiven Fertigung

Zunächst zeigt die Darstellung die notwendige und zum Teil durch die Anlagensoftware automatisierte Datenvorbereitung. Jedes additive Fertigungsverfahren benötigt als Ausgangsbasis ein Datenmodell des herzustellenden Bauteils. Als Quasistandard hat sich dafür das Standard Triangulation Language Format (STL) durchgesetzt. Dieses beschreibt die Objektoberfläche durch eine Vielzahl an Dreiecken mit zugehörigen Normalenvektoren. Alle gängigen CAD-Systeme ermöglichen die Erzeugung dieses Datenformates. Mit der Approximation der Oberfläche durch Dreiecke gehen Ungenauigkeiten einher, die durch Einstellparameter in der CAD-Umgebung wie die Sehnenhöhe und damit die Anzahl der verwendeten Dreiecke beeinflusst werden.

Der anschließende Slice-Prozess dient der Zerlegung des Bauteils in einzelne Schichten. Dieser in der Regel in der Anlagensoftware automatisch durchführbare Prozess erfolgt entsprechend der Möglichkeiten des jeweiligen Verfahrens bzw. der getätigten Einstellungen. Erst durch die Erzeugung der einzelnen Schichtgeometrien sind die Informationen, die die Anlagensoftware zur Erzeugung eines Bauteils benötigt, vorhanden. [25] [26] Die Anlagenvorbereitung ist stark verfahrensabhängig und reicht lediglich vom Einschalten der Anlage bis zum relativ aufwändigen Sieben und Mischen von Pulvern und der Einstellung von Anlagenparametern. [5] Bei jedem Verfahren sind die zu erzeugenden Bauteile in die Software einzuladen und im Baubereich zu positionieren. Mit diesem Schritt werden die Bauteilqualität sowie die Wirtschaftlichkeit des Prozesses stark beeinflusst. Durch den prozessbedingten Treppenstufeneffekt, anisotrope Bauteileigenschaften, notwendige Stützstrukturen sowie die von der Orientierung abhängige Bauhöhe ist dieser Vorgang wesentlich für das Prozessergebnis verantwortlich. [10]

Der eigentliche additive Fertigigungsprozess verläuft, entsprechend der Charakteristik der Verfahrensgruppe, schichtweise. Die Schritte Materialauftrag, Querschnittserzeugung und Absenken der Bauplattform werden wiederholt, bis alle herzustellenden Schichten erzeugt sind. Bei Verfahren, die Material durch Düsen entweder kontinuierlich oder diskontinuierlich in Tropfenform auftragen, ist die Querschnittserzeugung in dem Prozess des Materialauftrages inbegriffen, bei Pulverbettprozessen beispielsweise nicht. Hier wird erst durch eine separate Aktivierungsenergie beispielsweise in Form eines Lasers der Querschnitt erzeugt. [3] [4] [5] [6] [27]

Die anschließende Nachbereitung ist stark vom eingesetzten additiven Fertigungsverfahren abhängig. In Pulverbettprozessen werden Bauteile beispielsweise aus dem Pulverbett befreit. Bei anderen Prozessen erfolgt lediglich die Trennung von der Bauplattform. Viele additive Fertigungsverfahren benötigen an überhängenden Flächen und zum Teil komplett unterhalb des Bauteils Stützkonstruktionen. Die Gründe dafür sind unterschiedlich. Beim Laser-Strahlschmelzen, einem Verfahren, bei dem Metallpulver mithilfe eines Lasers zum Schmelzen gebracht wird, erfolgt über die sogenannten Supports unter anderem die Abfuhr der Prozesswärme. Bei den meisten anderen additiven Fertigungsverfahren ist die vorrangige Funktion des Supports das Abstützen der Überhänge gegen die Schwerkraft. In jedem Fall ist das Abtrennen des Supports notwendig und erfolgt zum Teil durch chemisches oder thermisches Auflösen oder wird mechanisch durchgeführt. Vereinfacht wird das Vorgehen in vielen Fällen durch die Verwendung eines separaten Materials für die Stützstrukturen. Dabei kann es sich um ein Material mit einer geringeren Schmelztemperatur handeln oder es ist beispielsweise im Gegensatz zum Beispiel wasserlöslich. Das Reinigen der Bauteile erfolgt oft durch das Sand- oder Glasperlstrahlen. Eine Bauteilnachbe-

arbeitung, also das Finishing kann sehr unterschiedlich sein und hängt von den Anforderungen an das Produkt ab. Additiv hergestellte Bauteile können zum Beispiel spanend bearbeitet oder beschichtet werden. [3] [4] [5] [6] [27]

Aufgrund des noch jungen Alters der Technologie kommt die Frage der Eingruppierung in die schon 1963 festgelegte und noch heute gebräuchliche Einteilung der Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen auf. Bei Betrachtung der Definition des Begriffes Urformen nach DIN 8580 scheint eine Eingliederung in diese Gruppe sinnvoll. Demnach ist damit das „Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes“ gemeint, wobei dabei „die Stoffeigenschaften des Werkstückes bestimmbar in Erscheinung“ treten. So können die jeweiligen additiven Fertigungsverfahren in die nach Ausgangsmaterialzustand unterteilten Untergruppen eingegliedert werden. [4] [28] [29] [30] Andere Ansätze versuchen die einzelnen Verfahren nicht ausnahmslos in die Hauptgruppe Urformen einzugliedern, sondern verteilen sie in unterschiedliche Hauptgruppen. Verfahren, die auf dem Verfestigen eines Pulvers beruhen, sind demnach kein „Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand“ (Gruppe 1.4) sondern „Fügen durch Schweißen“ (Gruppe 4.6). [31] [32] Sinnvoller erscheint eine Unterteilung aller Fertigungsverfahren nach dem angelsächsischen System in subtraktive, formative und additive Fertigungsverfahren [5] [33]. Allerdings ist diese im deutschsprachigen Raum nicht verbreitet.

Mittlerweile gliedern diverse Normen und Richtlinien die additiven Fertigungsverfahren. Dennoch führt eine Vielzahl an Begriffen zu einem teils schwer überschaubaren Markt. So wurde im Jahr 2003 beispielsweise eine Liste mit 40 unterschiedlichen Verfahren veröffentlicht, die dabei jedoch oft ein sehr ähnliches Grundprinzip beschreiben [34]. Ein sehr gutes Beispiel für die unnötige und teils verwirrende Namensvielfalt ist die des Laser-Strahlschmelzens, bei dem ein Metallpulver mithilfe eines Laserstrahls geschmolzen wird. So werden je nach Anlagenhersteller für dieses Verfahren die Begriffe Direktes Metall-Laser-Sintern (DMLS), LaserCusing oder Selektive-Laser-Melting (SLM) verwendet. [4] [5] Eine Möglichkeit mehr Transparenz für potentielle Nutzer und Kunden der additiven Fertigungsverfahren zu schaffen, ist das Erstellen von Normen und Richtlinien. Der weltweit erste Schritt erfolgte dahingehend durch die Erstellung der VDI Richtlinie 3404. Dort werden Grundlagen und Begriffe definiert und die Verfahren in 10 Prinzipien eingeteilt. Unter Mitwirkung des Deutschen Instituts für Normung (DIN) werden derzeit durch das Technische Komitee ISO/TC 261 der Internationalen Organisation für Normung (ISO) Dokumente erstellt, die eine internationale Standardisierung erwirken sollen. Dabei besteht auch eine enge Zusammenarbeit mit der American Society for Testing and Materials (ASTM) in Form einer ISO/ASTM PSDO (Partner Standards Development Organization). Diese gruppiert die Verfahren etwas anders und dem aktuellen Markt ange-

passt in sieben Gruppen. Ziel der Normungsaktivitäten ist insgesamt eine höhere Kundenzufriedenheit sowie die Reduzierung von Kosten und Aufwand. Neben Definitionen und der Terminologie sollen Werkstoffe, Prüfmethoden sowie der Datenprozess inklusive des neuen Datenformates AMF (Additive Manufacturing Format/File) enthalten sein, welches das bisherige STL um die Möglichkeit von Dreiecken mit gebogenen Verbindungslinien oder der zusätzlichen Speicherung von Material, Farbe und Gradienten erweitert. [8] [29] [35] [36] [37] Gegen den industriellen und wissenschaftlichen Versuch einer einheitlichen Nomenklatur agiert derzeit die enorme mediale Präsenz der Technologie. Dort werden die Verfahren in der Regel mit dem Begriff 3D-Druck oder 3D-Printing bezeichnet. Vorrangig durch die starke Verbreitung der sogenannten 3D-Drucker im Low-cost-Bereich kann die additive Fertigung jedoch in großem Umfang präsentiert, in privatem, universitärem und industriellem Umfeld eingesetzt werden und dringt somit in das Bewusstsein potentieller Nutzer der professionellen Technik. [38]

Die Notwendigkeit von Normung und klaren Definitionen wird unter anderem bei Betrachtung der stetig steigenden Verbreitung der Verfahren deutlich. Bild 2-2 zeigt getätigte Umsätze der Industrie in Mio. Dollar nach Wohlers. Von 2011 auf 2012 stieg der Umsatz im Bereich Anlagen und Material um 20,3 % auf 1,003 Mrd. \$. Durchschnittlich wuchs der Umsatz in diesem Bereich seit 2003 um ca. 17 %. In der Sparte Service war das Wachstum von 2011 auf 2012 mit 36,6 % auf 1,2 Mrd. \$ noch größer. Hier erfolgte seit 2002 ein durchschnittlicher Anstieg um etwa 18 %. Experten wie Wohlers prognostizieren ein Wachstum in den nächsten Jahren bis 2021 auf 11 Mrd. \$. [2]

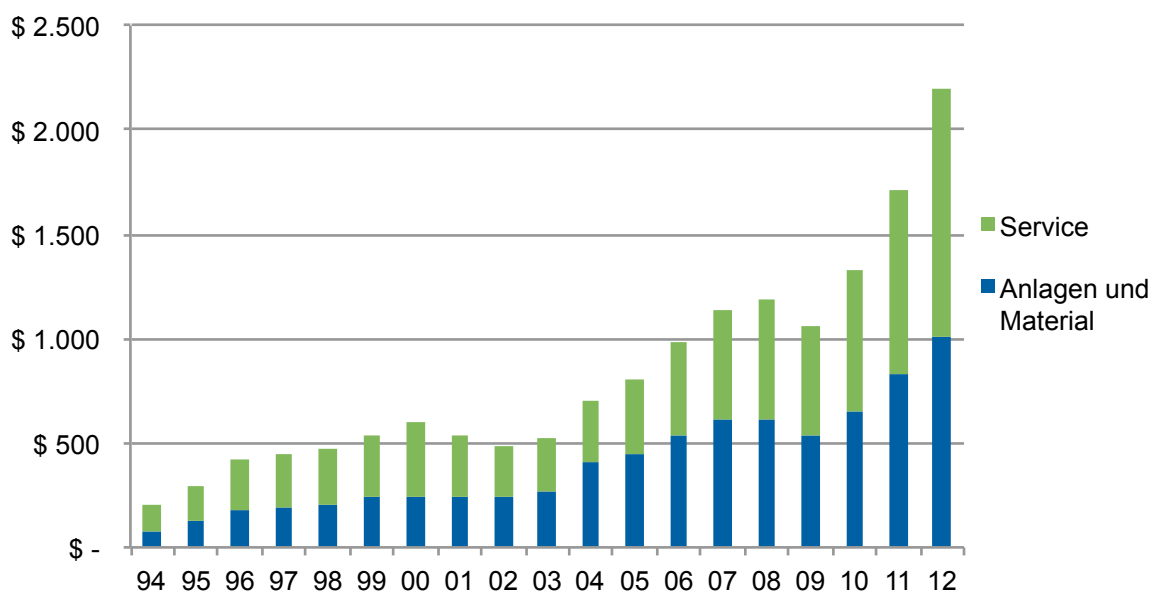


Bild 2-2: Umsätze von Anlagen, Material und Service (in Mio. Dollar) [2]

2.1.1 Begriffe und Definitionen

Im Folgenden sollen die wichtigsten Begrifflichkeiten der additiven Fertigung kurz erläutert werden. Dabei wird vorrangig auf die in der VDI Richtlinie 3404 gegebenen Definitionen verwiesen. Die derzeit stattfindenden Aktivitäten hinsichtlich internationaler Normen sowie weiterführender Richtlinien führen ebenfalls zu Begriffsklärungen, ähneln aber denen der VDI 3404. Die Gesamtheit der schichtweise arbeitenden Verfahren wird mit dem Titel additive Fertigung bzw. Additive Manufacturing (AM) bezeichnet. Die Anwendung dieser Technologie ist unterteilt in die Bereiche Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT) und Rapid Manufacturing (RM).

Rapid Prototyping

Rapid Prototyping ist die früheste Anwendung der additiven Fertigung. Sie dient der Herstellung von Modellen zu verschiedenen Zeiten im Produktentwicklungsprozess. Abhängig vom Fortschritt der Entwicklung und dem Einsatzbereich wird bei diesen Modellen zwischen Konzeptmodellen, Geometrie-, Funktions- und technischen Prototypen unterschieden. Die Anforderungen an das Bauteil steigen dabei von lediglich der Überprüfung des optischen Eindrucks über die Haptik, die Geometrie bis hin zu Funktionsüberprüfungen. [7] Die frühe Realisierung von Modellen hilft dabei die Entwicklungszeit und somit den Faktor „time-to-market“ wesentlich zu reduzieren. Eigenschaften des Produktes und somit potentielle Fehler können früh gezeigt und dadurch die Entwicklungskosten maßgeblich gemindert werden. [3] [4]

Rapid Tooling

RT beschreibt die Herstellung von Werkzeugen und Formen durch additive Fertigungsverfahren [7]. Zu einem großen Teil wird RT im Spritzguss eingesetzt. Dabei ist vor allem die Möglichkeit der konturnahen Kühlung im Formenbau zu nennen [5] [39]. Darüber hinaus ist mittlerweile eine generelle Verbreitung im Gussbereich oder in der Herstellung von Umformwerkzeugen zu sehen. [40] Neben den Zeitersparnissen in der Werkzeugherstellung ist auch die Verwendung von Werkzeugen mit alternativen und preiswerteren Werkstoffen bei Kleinserien möglich. [41] [42]

Rapid Manufacturing

Mit dem Begriff RM ist die direkte Herstellung von Endprodukten mithilfe der additiven Fertigung gemeint [7]. Aufgrund aktueller Trends wie steigender Variantenvielfalt [43] und Produktkomplexität sowie kürzer werdenden Produktlebenszyklen rückt dieser Begriff immer weiter in den Fokus. So sind additive Fertigungsverfahren bei einer Losgröße von eins oder kleinen Stückzahlen mittlerweile in der Fertigung im Einsatz. Unter anderem aufgrund der im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren geringen

Werkstoffvielfalt und den noch relativ hohen Kosten in der Serienproduktion handelt es sich dabei oft um sogenannte Nischenprodukte. [44] [45] [46]

Treppenstufeneffekt

Der für die additiven Fertigungsverfahren charakteristische und unter anderem für die Notwendigkeit der vorliegenden Arbeit verantwortliche Treppenstufeneffekt ist in Bild 2-3 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass das hergestellte Bauteil lediglich eine Annäherung an die hier in Blau dargestellte Kontur des CAD-Modells sein kann. Der Effekt tritt verstärkt an gewölbten und zur Bauplattform geneigten Flächen auf. [10] [11]

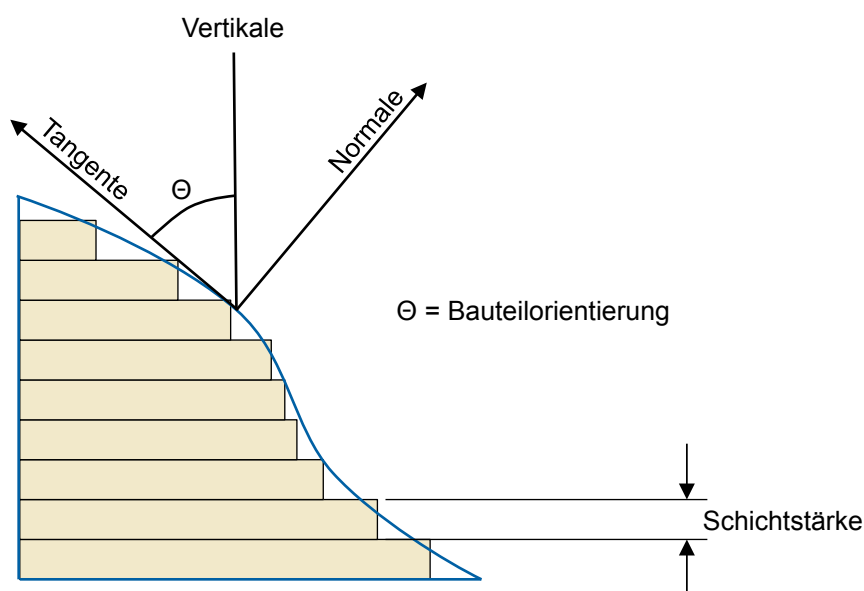


Bild 2-3: Treppenstufeneffekt und Definition des Neigungswinkels [11]

Demnach ist die Auswirkung des Effektes stark vereinfacht dargestellt eine Funktion, die von der Schichtstärke (S) und der Bauteilorientierung (θ) bzw. dem Winkel zwischen Bauplattform und Bauteilfläche ($90^\circ - \theta$) abhängt. Die Rauheit des Treppenstufeneffektes kann somit anhand Gleichung 2.1 bestimmt werden.

$$Ra = \frac{S}{2} |\cos(90 - \theta)| \quad (2.1)$$

Die Berechnung der theoretischen Rauheit basiert auf Ahn und unter Vernachlässigung aller weiteren Faktoren wie Materialeigenschaften, verfahrensspezifische Eigenschaften oder Prozessparametern. [47] [48] [49] Hier soll lediglich der Zusammenhang zwischen Orientierung, Schichtstärke und Rauheit verdeutlicht werden. Diese vereinfachte Darstellung ersetzt nicht die beispielsweise von Pandey erstellten komplexen mathematischen Zusammenhänge zur Ermittlung der realen Rauheit ei-

nes Bauteils unter Berücksichtigung aller prozess- und materialbedingter Parameter. [50] Bild 2-4 zeigt den Verlauf der errechneten Kurve exemplarisch für ein Verfahren mit einer Schichtstärke von 254 μm . Es wird deutlich, dass grundsätzlich senkrechte Flächen ($\theta = 0^\circ$) den geringsten Treppenstufeneffekt aufweisen. Dies ist auch für Flächen parallel zur Bauplattform ($\theta = 90$ bzw. 270°) der Fall. Die Darstellung ist also in dieser Form nur bei Neigungswinkeln größer 0° bzw. kleiner 180° gültig.

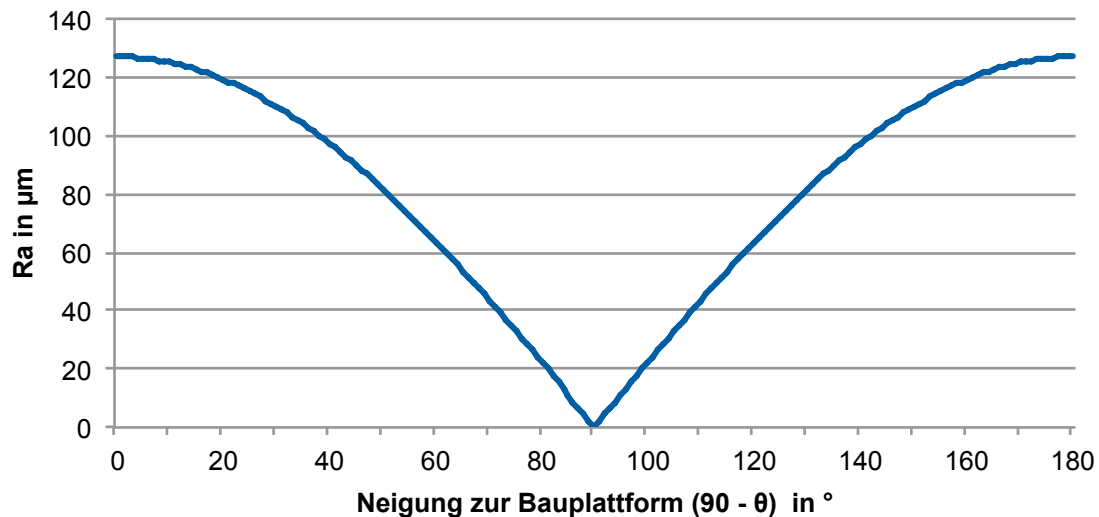


Bild 2-4: Theoretische Rauheit des Treppenstufeneffektes

2.1.2 Fused Layer Modeling (FLM)

Die schichtweise Herstellung eines Bauteils basiert beim Fused Layer Modeling (FLM) auf der Extrusion eines meist drahtförmigen, thermoplastischen Kunststoffes durch eine Düse. Diese bewegt sich in der Regel in der x-y-Ebene, während die Bauplattform, auf der das Bauteil erzeugt wird, in z-Richtung verföhrt. [4] [5] Bild 2-5 zeigt schematisch das Verfahrensprinzip. Durch die materialspezifische Temperierung der Düse wird der Kunststoff zähflüssig und durch das Nachdrücken des Drahtes mit Förderrädern extrudiert. In jeder Schicht erfolgt zunächst die Konturerzeugung des entsprechenden Querschnittes, worauf das Ausfüllen des Innenbereiches folgt. Die Schichtstärke variiert je nach verwendetem Material und nach Anlagentyp derzeit zwischen 127 und 330 μm [51]. Dabei ist der Düsenquerschnitt nicht alleine ausschlaggebend für die Schichtstärke. Durch das Anpressen des Materials ist diese geringer als der Düsenquerschnitt. Dadurch wird ebenfalls eine homogenere Oberfläche geschaffen. Durch die konstante, aber unterhalb der Glasübergangstemperatur des Materials vorherrschende Umgebungstemperatur im Bauraum, erfolgt das Abkühlen des frisch aufgetragenen Materials. Bedingt durch den Wärmeübergang auf die bereits vorhandene Schicht wird diese so stark erhitzt, dass eine thermisch induzierte Verbindung zwischen den Schichten stattfindet. [3] [6] [27] [51]

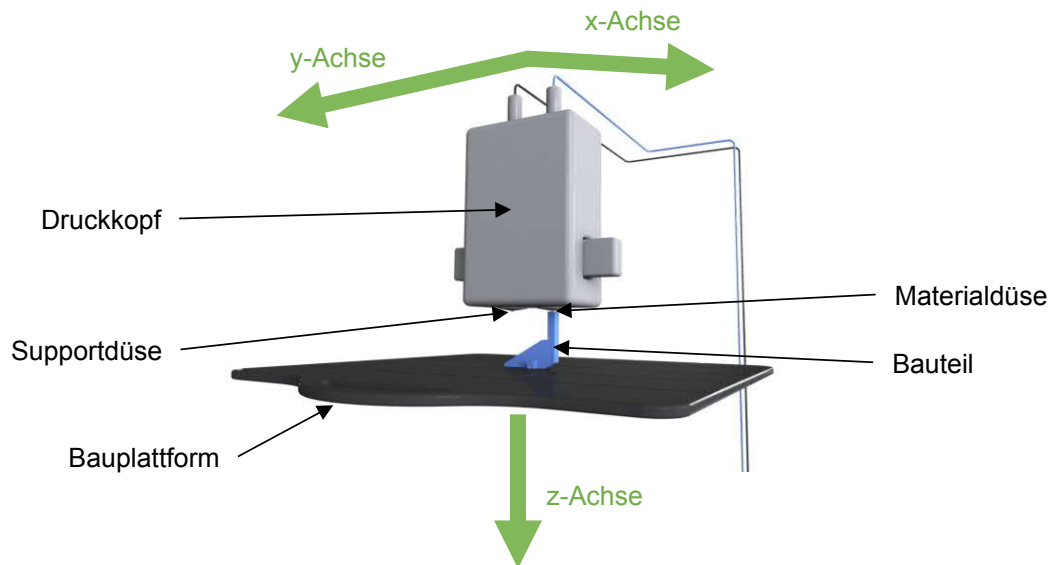


Bild 2-5: Verfahrensprinzip des FLM mit getrenntem Bau- und Supportmaterial

Die Grundfläche des gesamten Bauteils, Hohlräume und Überhänge sind bei der Herstellung durch die beschriebenen Stützstrukturen gegen die Schwerkraft abzustützen. Diese können durch eine zweite Düse aufgetragen werden und bestehen dann aus einem anderen Material als das eigentliche Bauteil. Die Supportstrukturen führen zudem neben der abstützenden Funktion zu einer guten Haftung auf der Bauplattform und wirken Eigenspannungen entgegen. Stratasys, führender Hersteller von FLM-Anlagen, unterscheidet zwischen zwei Supportmaterialien. Neben dem Break Away Support System (BASS), einem sehr spröden Material, gibt es das sogenannte WaterWorks (WW). Dabei wird das Bauteil inklusive des Supports in eine wässrige Seifenlauge gelegt, welche unter Zuhilfenahme von Temperatur und Ultraschall für ein Auflösen des Supports sorgt. Anhand der Anlagenbezeichnung ist bei der Firma Stratasys das zu verarbeitende Supportmaterial zu identifizieren. SST steht für Soluble Support Technology, also auflösbares Material, BST für Breakaway Support Technology, also sprödes Supportmaterial. [5] [42] [52]

Auf dem Markt eingeführt wurde das Verfahren 1991. Mittlerweile ist das FLM die am weitesten verbreitete Technologie. Im Bereich der Anlagen mit einem Verkaufswert über 5000 \$ verkaufte Stratasys, lange Zeit alleiniger und heute führender Anbieter, bis Ende 2012 21.000 Anlagen. Davon wurden in 2012 alleine 3.026 und in 2011 2.555 Systeme verkauft. Zwischenzeitlich, von 2010 bis 2012, wurden teilweise Anlagen von Stratasys unter dem Namen Hewlett-Packard vertrieben. Eine Begründung für das Ende der Vermarktungsstrategie ist nicht bekannt. [2] Mittlerweile gibt es aufgrund abgelaufener Patente auch andere Firmen im industriellen Einsatz. Zu nennen sind die Firma Arburg, die mit einem modifizierten Verfahren arbeitet [53] oder die Firma Beijing Tiertime Technology [54]. Material für die Anlagen von Stratasys wird

auch von der Firma iSquared zur Verfügung gestellt. [55] Problematisch bei der Verwendung von Drittanbieter-Materialien ist die von Dahlin et al. entwickelte und von Stratasys patentierte Materialüberwachung. Art und Farbe des Materials, Füllstand und sämtliche Daten werden über ein Electrically erasable programmable ROM (EEPROM) gespeichert. Somit wird die Nutzung fremder Materialien erschwert. [56] [57] Die damit verbundene Vormachtstellung zeigt sich unmittelbar im Materialpreis. Während ABS als Rohmaterial 1,90 – 2,40 €/kg (Stand 2007) [58] und für die später beschriebenen Consumer Anlagen 15 – 50 \$/kg kostet, liegt der Verkaufspreis für ein Kilogramm ABS in einer Stratasys-Kassette bei 250 \$. Neben ABS (zu 90 %) kommen beispielsweise Polycarbonat (PC), PC/ABS Blends oder Polyactide (PLA) zum Einsatz, seit neustem auch Polyamid, beispielsweise von der Firma Taulman oder von Stratasys. [2] [51] [59]

Eine besondere Rolle spielt das FLM unter den additiven Fertigungsverfahren aufgrund der Verbreitung im Consumer Bereich. Unter dem nach VDI Richtlinie 3404 irreführenden Begriff 3D Drucker [7] stieg in den Jahren 2008 bis 2011 die Anzahl der verkauften Anlagen unter 5000 \$ pro Jahr um durchschnittlich 346 % jährlich von 355 auf 24265 Anlagen. 2012 waren es 35508 Anlagen, was einem Wachstum von 46,3 % entspricht. [2] Die rasante Verbreitung und der Beginn der Verwendung der recht einfachen Technologie in preiswerten Anlagen für den Consumer Bereich begann nicht zuletzt aufgrund des abgelaufenen Patentes des Grundkonzeptes des Erfinders Crump von 1992, angemeldet durch die Firma Stratasys. [60] Innerhalb kürzester Zeit kam es zu einer hohen Dichte an Start-Ups wie MakerBot, Solidoodle oder Ultimaker, um nur wenige zu nennen. Auch etablierte Anlagenhersteller aus dem höheren Preissegment, unter anderem auch Inhaber des Urpatentes Stratasys sowie der in anderen Bereichen der additiven Fertigung bekannte Anlagenhersteller 3D Systems zogen mit Anlagen unter 5000 \$ Marktpreis nach. [2] [8] [9] 2013 setzte die Erfurter Fachmesse Rapid.Tech Akzente durch die erstmalige Durchführung einer Parallelmesse zur seit nunmehr zehn Jahren etablierten und renommierten Fachmesse und Anwendertagung. In der „FabCon 3.D“ genannten Parallelveranstaltung geht es ausschließlich um den 3D-Druck, wie das Verfahren in der Presse üblicherweise bezeichnet wird, im unteren Preissektor. Erste Schätzungen gehen davon aus, dass durch die steigende Verbreitung bereits 2020 jeder zehnte deutsche Haushalt mit einem 3D-Drucker ausgestattet sein könnte. [61] [62] Interessant ist auch die Betrachtung der Gartner Kurven von 2012 und 2013. Gartner oder auch Hype-Kurven genannt, beschreiben den Verlauf einer technischen Innovation. Demnach folgt auf die technische Auslösung ein Anstieg der Aufmerksamkeit bis hin zum Höhepunkt einer übertriebenen Erwartung, gefolgt von Ernüchterung, der allmählichen Aufklärung und dem abschließenden Erreichen des Rentabilitätsniveaus. [63] Während im Jahr 2012 die additiven Fertigungsverfahren als Gesamtes durch „3D-

Printing“ vertreten waren, welches sich derzeit nach Gartner auf dem Höhepunkt der übertriebenen Aufmerksamkeit mit einer Zeit von fünf bis zehn Jahren zum Erreichen des Rentabilitätsniveaus befand, erfolgte in der Kurve für 2013 die Aufteilung in „Consumer 3D-Printing“ und „Enterprise 3D-Printing“. Die Zeit zum Erreichen der Rentabilität wurde für den Enterprise Sektor auf zwei bis 5 Jahre korrigiert. Auf dem Höhepunkt der Aufmerksamkeit befindet sich nun der Consumer Bereich. Auch hier wieder mit einer Voraussage von fünf bis zehn Jahren bis zur Rentabilität. [64] [65] Insgesamt zeigen diese Fakten das enorme Potential, welches unter anderem durch das FLM entstanden ist. Die Verbreitung in den Consumer Bereich hat zumindest zu einer sehr intensiven Beschäftigung mit dem Thema additive Fertigung geführt und somit die Entwicklung maßgeblich beeinflusst.

Die weite Verbreitung des Verfahrens und das Mitwirken der Consumer und Hobby Szene bringt eine große Vielfalt an Optimierungsbedürfnissen und Forschungspotential. Im Folgenden sollen aufgeteilt in die Kategorien RP, RT und RM exemplarisch derzeitige Forschungen herausgestellt werden. Die Zusammenfassung kann und soll keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben, jedoch das grundlegende Potential und den Nutzen des FLM deutlich machen. Da das FLM in dieser Arbeit im RT eingesetzt werden soll, liegt dort der Fokus.

Ursprünglich für den Zweck des Prototypenbaus kommerzialisiert, hat auch heute das FLM im Bereich RP eine weite Verbreitung. Zum Einsatz kommen Modelle in allen Industriezweigen und sämtlichen Bereichen der Produktentwicklung. Die Beispiele sollen die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten zeigen. So fertigt Laliberté eine Reihe von Gelenken und Teilen für Roboterprototypen an. Mechanisch stark belastete Segmente stabilisiert er durch Metalleinsätze. [66] Im Windkanal bringt Ahmadi Nadooshan FLM-Modelle zum Einsatz. Dabei vergleicht er die Ergebnisse mit konventionell, aus Metall hergestellten Exemplaren und stellt fest, dass die Resultate vergleichbar sind. [67] Durch eine dünne galvanische Beschichtung erfolgt dabei eine weitere Annäherung an die Ergebnisse der gefrästen Bauteile. [68] Neben Kosten- und Zeitersparnis kann bei der Herstellung von Bauteilen für sogenannte Micro Air Vehicles (MAV, Drohnen) durch hohle bzw. mit einer inneren Gitterstruktur gebaute Teile zur Gewichtsreduzierung beigetragen werden. [69] [70] In der Erdbebenforschung wird ein maßstabsgetreues Gebäudemodell auf einen Rütteltisch gestellt und die Messungen der Reaktion des Modells mit denen eines wesentlich größeren Stahlprototypens verglichen. Die Ergebnisse sind vielversprechend, jedoch stehen wesentliche Untersuchungen, zum Beispiel um das unterschiedliche Dämpfungsverhalten von ABS und Stahl zu berücksichtigen aus, bevor sich FLM-Modelle letztlich als Vorhersagemodelle eignen. [71] Gao stellt mithilfe des FLM einen Roboter in Form eines fliegenden Fisches her, welcher für die Aufzeichnung und Erforschung

der Meere genutzt werden könnte. [72] Neben den vielzähligen wissenschaftlichen Publikationen berichtet der Anlagenhersteller Stratasys regelmäßig in Form von Case Studies von erfolgreicher Anwendung der Technologie in unterschiedlichsten Stadien der Produktentwicklung. Dabei sind sowohl Hersteller und Institute der Luft- und Raumfahrt- sowie der Automobilindustrie als auch Medizintechnik, Verteidigungs- und Konsumgüterindustrie vertreten. [73]

Schon 1997 erfolgt die Untersuchung der Eignung von FLM-Bauteilen als Urmodell für den Feinguss, also den Einsatz im RT. Dabei werden gewöhnlich kleine Wachsmodele zu sogenannten Modelltrauben zusammengeführt, mehrmals in feinkeramische Masse getaucht und besandet. Nach dem Ausschmelzen des Wachses kann Metall in die entstandenen Formen gegossen werden. [74] Zur Reduzierung der Oberflächenrauheit der späteren Gussteile und zur Abdichtung beim Tauchen und Besanden benetzt Blake die FLM-Bauteile mit einer dünnen Wachsschicht. Im Gegensatz zu Wachs muss das ABS nicht ausgeschmolzen sondern -gebrannt werden. Dazu sind entsprechende Entlüftungsöffnungen an den Modellen vorzusehen. Beim Ausbrennen kommt es teilweise zu Rissen in den Formschalen und Rückstände der Asche sind möglich. Risse entstehen dabei durch das Ausdehnen des ABS. Es wird eine Verbrennungstemperatur von 800 °C als ausreichend beschrieben, Restasche-probleme zu beseitigen. [75] [76] Idris versucht das Aufbrechen der Formen durch unterschiedliche Maschinenparameter und Temperaturen zu minimieren. Eine Gitterbauweise scheint dabei vielversprechend. So können die Modelle bei der Verbrennung nach innen kollabieren, anstatt sich nach außen auszudehnen. Die Restasche-problematik soll ab einer Temperatur von 550 °C nicht mehr relevant sein. [77] Aufbauend auf solchen verfahrensspezifischen Untersuchungen erschienen mit der Zeit Hinweise auf die geeignete Auswahl des additiven Fertigungsverfahrens und der Vorgehensweise. Dabei wird zwischen direktem und indirektem RT unterschieden. Gemeint ist damit, dass die hergestellten Modelle direkt die ursprünglichen Gussmodelle ersetzen oder als Formen zur Erzeugung von Gussmodellen dienen. Entscheidend bei der Auswahl sind unter anderem die Faktoren Wirtschaftlichkeit, Maßhaltigkeit und Oberflächengüte. [78] [79] [80] Der geringe Materialeinsatz und die schnelle Verfügbarkeit sind bei Modellen von hoher Komplexität besonders vorteilhaft. So liegt ein besonderes Augenmerk bei der Entscheidung, ob ein Modell gefräst oder per FLM hergestellt wird, auf der Fertigungs- bzw. Vorlaufzeit. Diese kann beim FLM um bis zu 90 % kürzer sein. [81] [82] Neben den Fein- und Sandgussanwendungen wird die Möglichkeit der Formherstellung für das Extrusionsblasformen beschrieben. Mit relativ einfachen FLM-Formen sind hier bis zu 1000 Teile herstellbar, wobei Ziel des Einsatzes die Prototypenherstellung ist. [83] Auch das Abformen von Kohlefaser-schichten auf FLM-Modellen ist möglich. So ist beispielsweise die Herstellung von Fahrradsätteln durchführbar. Dabei kann auch das FLM-Bauteil völlig von Kohlefaser

umgeben und somit Teil des Endproduktes sein. [84] Macy stellt letztlich verschiedene FLM-Materialien gegenüber, beschreibt die möglichen Einsatztemperaturen und das Potential zur Verarbeitung von Verbundwerkstoffen. Wie in nahezu allen Einsatzmöglichkeiten wird auf die wesentliche Verkürzung der Herstellungszeit und Reduzierung der Kosten eingegangen. [85] Auch für umformende Prozesse hat sich eine Anwendung von FLM-Bauteilen gefunden. So ist ein positiver Einsatz zur Herstellung von Werkzeugen bzw. Stempeln für das Hydroforming und das Pressen mit elastischen Kissen gelungen. In beiden Fällen wird lediglich ein Prägestempel verwendet, da die Gegenform durch eine Hydraulikflüssigkeit bzw. ein Gummikissen gegeben ist. [86] In einem Patent von 2008 ist die Herstellung von Stempeln und Matrizen zum Pressen beschrieben. Das Umformen von Blechen für Flugzeugkomponenten wird als Beispiel angeführt. [87] 2012 erfolgt die Weiterentwicklung, bei der lediglich eine Hüllgeometrie des Werkzeuges durch das FLM hergestellt und der mit Supportmaterial versehene Innenbereich zusätzlich mit Epoxidharz gefüllt wird. Im Anschluss kann auf dem entstandenen Werkzeug mit Faserverbundwerkstoffen aufgebaut und verpresst werden. [88]

Veröffentlichungen zum Einsatz der Technologie im Rapid Manufacturing sind kaum vorhanden. Zum Teil werden die Bauteile, die vormals als Prototypen hergestellt werden auch endgültig genutzt. Beispiele dafür sind die beschriebenen MAV oder die Greiferkomponenten. Für Kleinserien oder Einzelteilerfertigung werden ebenfalls von der Firma Stratasys regelmäßig Case Studies veröffentlicht. Zu nennen sind Sichtschutzvorrichtungen für Bankautomaten, Elemente von Sitzen für eine Bohrplattform oder Teile eines Rahmens für ein Unterwasserfahrzeug. [89] [90] Weit verbreitet ist das Verfahren auch in der Medizintechnik, bei der aufgrund der individuellen Geometrie eines jeden Patienten die Stückzahl eins gefordert ist. So werden Modelle zur Operationsplanung zum Beispiel bei Kiefer-, Hüft- oder Schädeloperationen verwendet. [91] [92] [93]

Verwendetes Anlagensystem

Für die Versuche dieser Arbeit wird eine Dimension 1200es SST der Firma Stratasys verwendet. Sie verfügt über einen Bauraum von $254 \times 254 \times 305 \text{ mm}^3$ und arbeitet mit einer Schichtstärke von 254 bzw. 330 μm , wobei immer der kleinere Wert zum Einsatz kommt. Baumaterial ist ABSplus, ebenfalls ein Produkt der Firma Stratasys. [52] Entsprechend dem Anlagensystem wird lösbares Supportmaterial verwendet. Die Anlage ist besonders einfach aufgebaut und bietet kaum Möglichkeiten den Prozess aktiv zu beeinflussen. Temperaturen, Bahnenabstand, Anordnung der Füllbahnen etc. bleiben konstant. Einzig durch die Schichtstärke, die wenigen in der Software vorhandenen Möglichkeiten und natürlich die Bauteilorientierung kann Einfluss auf das Bauteil genommen werden. Bei der Bauteilfüllung stehen die Optionen „voll-

gefüllt“, „Sparse (geringe Dichte)“ und „Sparse (hohe Dichte)“ zur Verfügung. „Vollgefüllt“ bedeutet, dass im gesamten Bauteilinneren Materialbahnen dicht nebeneinander hergestellt werden, wobei von Schicht zu Schicht eine Rotation der Auftragsrichtung um 90° stattfindet. Bei den „Sparse“ Einstellungen entfernen sich die Materialbahnen von geringer zu hoher Dichte voneinander. Die 90° Rotation findet ebenfalls statt. Somit entsteht eine Gitterbauweise, die zu einer Material- und Zeitersparnis führt, jedoch auch die Festigkeitseigenschaften beeinflusst. [94] [95] Die Materialbahnen einer Schicht der unterschiedlichen Ausführungen sind in Bild 2-6 dargestellt.

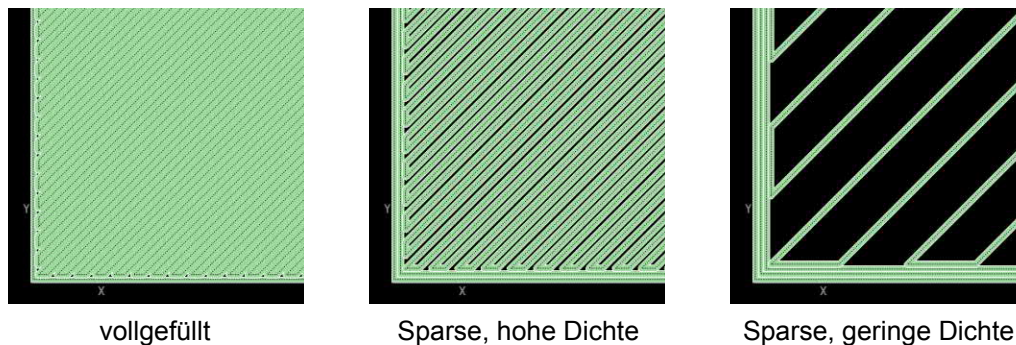


Bild 2-6: Darstellung der unterschiedlichen Bauteilfüllungen

Neben der Bauteilfüllung kann der automatisch erzeugte Support durch vier unterschiedliche Auswahlmöglichkeiten beeinflusst werden. „Basic“ steht für einen Support, bei dem ein konstanter Abstand zwischen den Supportbahnen besteht. „Teilgefüllt“ vergrößert diesen Abstand, wodurch Material und Zeit eingespart, jedoch auch die Supportwirkung reduziert werden. Die Einstellung „Minimal“ reduziert den Supporteinsatz weiter und wird ausschließlich für kleine und filigrane Bauteile empfohlen. Durch die Einstellung von „Surround“ erfolgt die gesamte Einhüllung der Bauteile mit Supportmaterial, was bei sehr dünnwandigen, großen Teilen sinnvoll sein kann. [94] [95]

Weitere Einflussmöglichkeiten bestehen lediglich in der Orientierung des Bauteiles. So kann beispielsweise die Höhe und damit die Bauzeit reduziert oder eine Fläche mit besonders hohen Ansprüchen an die Oberflächenqualität senkrecht ausgerichtet werden. Die besseren mechanischen Eigenschaften innerhalb einer Schicht im Vergleich zu denen zwischen mehreren Schichten sind ebenfalls zu beachten. [95]

2.2 Galvanik

Nach dem italienischen Arzt Luigi Galvani benannt, ist die Galvanotechnik grundsätzlich das Niederschlagen metallischer Abscheidungen auf Oberflächen. In den meisten Anwendungsfällen dient dies der Beschichtung der Oberflächen mit schützender oder dekorativer Funktion, also dem Beschichten aus dem ionisierten Zustand. In

einigen Anwendungsfällen, wie auch in dieser Arbeit, erfolgt jedoch die Erzeugung eines Bauteils durch die Galvanoformung, wonach eine Einordnung in das Urformen aus dem ionisierten Zustand richtig ist. Es existiert eine Vielzahl an Abscheidungsverfahren und -materialien. Im Folgenden soll auf das eingesetzte schwefelsaure Abscheiden elementaren Kupfers durch das Gleichstromverfahren eingegangen werden. [28] [96] [97]

2.2.1 Verfahrensprinzip

Der grundlegende Aufbau der Galvanisierung ist in Bild 2-7 dargestellt. Zwei über eine Gleichstromquelle verbundene Elektroden werden in eine Elektrolytlösung getaucht. Eine Elektrolytlösung, kurz Elektrolyt, ist eine Flüssigkeit, die durch elektrolytische Dissoziation von Salzen zu einem Ionenleiter wird. Sie ist somit als Leiter zweiter Klasse einzustufen. Bei den durchgeführten Versuchen wird Kupfersalz (CuSO_4) verwendet, welches in Wasser zu Cu^{2+} - und $(\text{SO}_4)^{2-}$ -Ionen dissoziiert. Zur Vermeidung einer spröden und grobkristallinen Kupferstruktur erfolgt eine Beimischung von Schwefelsäure. Diese erhöht die Leitfähigkeit des Elektrolyten und somit die Möglichkeit einer feinkristallinen und kompakten Kupferstruktur. [96] [98]

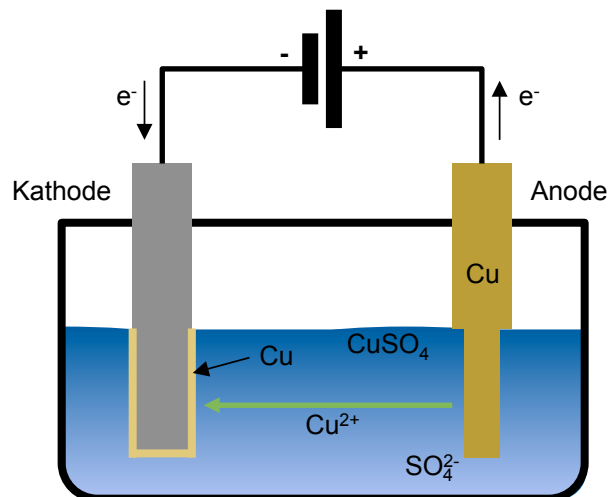


Bild 2-7: Verfahrensprinzip der Galvanik (in Anlehnung an [96])

Das Grundprinzip der dargestellten Galvanisierung ist eine Redoxreaktion. Dabei agiert das zu beschichtende, am elektrischen Minus-Pol angeschlossene Bauteil als Kathode und das Ausgangsmaterial als Anode. Die Anode kann beispielsweise in Form eines mit Kupferkugeln gefüllten Korbes vorliegen. Beim Anlegen eines Gleichstroms erfolgen die Oxidation an der Anode und die Reduktion an der Kathode. Für den vorliegenden Anwendungsfall kann die Oxidation durch Gleichung 2.2 beschrieben werden. [99]



Kupfer geht also hydratisiert als Kation in das Elektrolytbad. Die Reduktion der Kathodenseite ist mit Gleichung 2.3 beschrieben. Kupferionen werden an der Kathode zu metallischem Kupfer entladen während Elektronen an das Elektrolytbad übergehen. [99]



Treibende Kraft für den Kupferionentransport von der Anode zur Kathode ist das durch die angelegte Spannung an den Elektroden entstehende elektrische Feld im Elektrolyt. In diesem Feld wirkt eine elektrische Kraft auf die Ionen in Richtung der entstandenen Feldlinien zwischen Anode und Kathode. Die Kraft ist proportional zur Feldstärke E , wodurch die Betriebsspannung ein wesentlicher Parameter der Galvanik ist und mit ihr der Geschwindigkeitsvektor in Feldlinienrichtung steigt. Die elektrische Kraft hat in einem ruhenden Elektrolyt einen großen Einfluss. In einer bewegten Lösung tritt die hydrodynamische Kraft in Erscheinung. [100] Zur Veranschaulichung des galvanischen Prozesses dient häufig die Darstellung der Feldlinien. Damit können jedoch nur grobe Tendenzen wiedergegeben werden, da der eigentliche Kennwert für lokale Abscheidungen die vektorielle Größe J , die Stromdichte ist. Der Zusammenhang lässt sich mithilfe des Faraday'schen Gesetzes (Gleichung 2.3) herleiten: [101]

$$\Delta m = M_{\text{molar}} \cdot \frac{Q_{\text{el}}}{z \cdot F} \quad (2.3)$$

mit: M_{molar} = molare Masse des Schichtmaterials
 Q_{el} = transportierte Ladung
 z = Ladungszahl
 F = Faraday-Konstante

Mit der Definition der transportierten Ladung gemäß Gleichung 2.4 kann das Faraday'sche Gesetz zu Gleichung 2.5 umgeformt werden.

$$Q_{\text{el}} = I \cdot t \quad (2.4)$$

mit: I = elektrische Stromstärke
 t = Zeit

$$\frac{M_{\text{molar}} \cdot I}{z \times F} = \frac{\Delta m}{t} = \dot{s} \quad (2.5)$$

mit: \dot{s} = galvanische Abscheidungsrate

Die Stromstärke I wird im vorliegenden Anwendungsfall auf eine endliche, die zu beschichtende Fläche bezogen und kann somit durch die vektorielle Stromdichte \vec{J} ersetzt werden. Dieser Zusammenhang ergibt eingesetzt in Gleichung 2.5 und unter der Berücksichtigung der Relation in Gleichung 2.6 den direkten Zusammenhang zwischen Abscheidungsrate und Feldstärke und somit der Felddichte.

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \quad (2.6)$$

2.2.2 Prozessbeeinflussende Effekte

Die gezeigte, rein physikalische Herleitung stellt nicht den realen Fall dar. Neben den dargestellten Einflüssen sind weitere Faktoren für das Verhalten der galvanischen Abscheidung verantwortlich. Auf die wichtigsten wird im Folgenden eingegangen.

Feldlinienkonzentration

Die in der Literatur häufig verwendete Darstellung der Feldlinien als Maß für die galvanische Abscheidung ist, wie beschrieben, nur eine bildliche Darstellung. Vielmehr soll damit das Entstehen von Stromdichteunterschieden, die den hergeleiteten direkten Einfluss auf die Abscheidungsrate haben, verdeutlicht werden. Trotzdem erfolgt anhand der üblichen Darstellung die Erklärung einer möglichen Beeinflussung der Feldlinien und somit der Stromdichte. Aufgrund dieses Zusammenhanges soll ab hier der eher zutreffende Begriff Stromlinien eingesetzt werden. Bild 2-8 zeigt auf der linken Seite eine Kathode, also ein zu beschichtendes Bauteil, zwischen zwei Anoden.

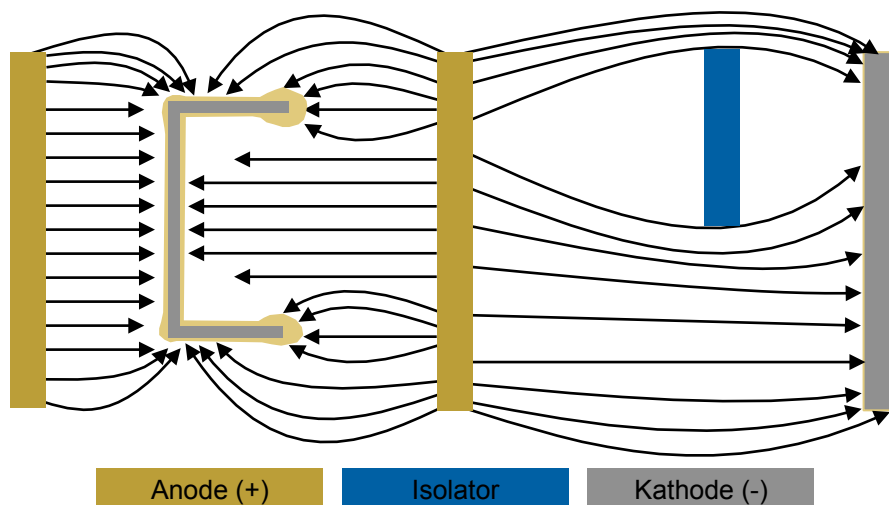


Bild 2-8: Darstellung von Stromlinien- bzw. Stromdichteverteilung [96] [102]

Die Stromlinien führen durch die angelegte Spannung von den Anoden zur Kathode. Dabei entsteht eine Konzentration an Bauteilkanten. Auswirkung davon ist eine hohe Stromdichte an diesen Stellen, wodurch es zu einer schnelleren Abscheidung in die-

sen Bereichen kommt. Eine konstruktive Möglichkeit dem entgegenzuwirken ist das Abrunden von Bauteilkanten. Zudem neigen Stromlinien dazu, den kürzesten Weg von Kathode zu Anode zu wählen. Demnach erfolgt an näher zur Anode liegenden Bauteilsegmenten eine schnellere Abscheidung. Dieser Effekt wird im Laufe der Zeit durch das schnelle Wachstum verstärkt. [96]

Zwischen der rechten Kathode und der mittleren Anode ist ein Isolator bzw. eine Blende dargestellt. Für die Stromlinien ist dieser undurchdringbar und führt somit zu einer Umlenkung. Ist das Hindernis weit genug von der Kathode entfernt, können sich die Stromlinien danach wieder homogen ausbreiten, wodurch kein Einfluss auf die Abscheidung resultiert. Je näher sich die Blende jedoch an der Kathode befindet, desto stärker ist die abschirmende Wirkung. Ursache für eine solche Umleitung kann neben einem bewusst eingesetzten Hindernis auch eine Elektrolytverarmung in einem bestimmten Bereich sein. Das bedeutet, dass in diesem Bereich nicht mehr ausreichend Stoffe oder zumindest weniger als in angrenzenden Bereichen des Elektrolyten vorhanden sind, die für die Leitfähigkeit zuständig sind. [100] [102]

Konvektion

Konvektion beschreibt grundsätzlich die Umwälzung von Fluiden. Dabei wird zwischen natürlicher und erzwungener Konvektion unterschieden. Die natürliche Konvektion entsteht durch lokale Unterschiede, wie beispielsweise Dichte- und/oder Temperaturgradienten. Eine erzwungene Konvektion erfolgt durch externe, mechanische Krafteinwirkung. Die Bedeutung der Konvektion in der Galvanik liegt in der Verteilung von Metallionen und anderen galvanisch aktiven Stoffen im Elektrolyt. Ist beispielsweise die Konvektion an der Grenzschicht zwischen zu beschichtendem Bauteil und Elektrolyt zu gering, vermindert sich der Stofftransport. Die Konzentration der galvanischen Stoffe sinkt dadurch immer weiter ab, sodass es lokal zu geringeren Abscheidungsgeschwindigkeiten und unter Umständen einer verminderten Abscheidungsqualität kommt. Eine reduzierte Qualität resultiert dabei vorrangig aus einem Mangel an nachgelieferten Additiven. Die Quantität der Abscheidung wird durch die Verarmung und somit die sinkende Leitfähigkeit hervorgerufen. In direktem Zusammenhang kommt es dadurch zu einem lokalen Absinken der Stromdichte. Analog kann eine Erhöhung der Konvektion an der Phasengrenze zu einer ebenfalls erhöhten Stromdichte und somit Abscheidungsgeschwindigkeit führen. Dieser Zusammenhang wird zum Beispiel beim Einsatz eines Lasers zur lokalen Erwärmung und somit erhöhter Konvektion oder durch Einsatz von Ultraschall oder durch Einblasen von Luft genutzt, um die Abscheidungsraten zu erhöhen. [96] [103] [104]

Diffusionsschicht

Die Nernst'sche Diffusionsschicht beschreibt einen Bereich unmittelbar vor der Kathode, in dem der Transport elektrochemisch aktiver Stoffe ausschließlich über Diffusionsvorgänge stattfindet. Die Stoffkonzentration nimmt somit in Richtung der Kathodenoberfläche ab, wodurch ein Widerstand, der sogenannte Diffusionswiderstand entsteht. Die Ausprägung ist abhängig von der vorherrschenden Stromdichte. Ist diese sehr hoch, kann es dazu kommen, dass alle nahe der Kathode vorhandenen Stoffe unmittelbar abgeschieden werden und somit die Konzentration gegen Null geht. Dieser Zustand wird Überspannung genannt. Um die Nernst'sche Schicht zu durchqueren, benötigen die Kupferionen zusätzliche Energie, die Diffusionsüberspannung genannt wird. Durch ausreichende, erzwungene Konvektion ist eine Reduzierung der Schicht von ca. 0,5 mm auf minimal 1 μm möglich. Die Diffusionsüberspannung bzw. der Diffusionswiderstand ist demnach eine Funktion der Konvektionsintensität. [96] [100]

Elektrolytische Doppelschicht

Die elektrolytische Doppelschicht ist ein elektrochemisches Phänomen, bei dem sich nach Helmholtz ein nicht-linearer, nicht-ohmscher Widerstand durch die ständige Oxidation und Reduktion an der Kathode ausbildet. Dieser Polarisationswiderstand ist dabei mit dem Widerstand des Elektrolyten in Reihe geschaltet. Zu erklären ist dieses Phänomen mit den hydratisierten Kupfer-Kationen, die nach dem Durchqueren der Diffusionsschicht einen Flächenbelag an der Kathode bilden. Die Elektrodenoberfläche wird polarisiert und es entsteht eine Potentialdifferenz zwischen dem Elektrolyten und der negativ geladenen Kathode. Der Bereich ist gerade so dick wie ein halber Ionendurchmesser. Zum Überwinden des Polarisationswiderstandes fällt die sogenannte Polarisationsüberspannung an. [96] [100] [101]

Additive

Einen wesentlichen Einfluss auf das Prozessergebnis der Galvanik haben Additive, die dem Elektrolyten beigemischt werden. Auf die Zusammensetzung des Elektrolyten wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Die für die Versuche eingesetzten Elektrolyten bleiben weitestgehend konstant. Bei Veränderungen erfolgt eine Berücksichtigung in der Interpretation. Trotzdem folgt eine Aufzählung der wichtigsten Additive und ihrer Auswirkungen. Glanzbildner begünstigen bei entsprechender Temperatur und Stromdichte durch die Reduzierung der Korngröße des abgeschiedenen Materials die Entstehung von glänzenden Kupferoberflächen. Einebnen hemmen das Wachstum an hochgelegenen Strukturen, wodurch die Wachstumsrate in Vertiefungen verhältnismäßig am höchsten ist. Somit können bei kleinen Unebenheiten trotz

der schlechten Ausgangsbedingungen relativ ebene Oberflächen erzeugt werden. Einebnern beinhalten wasserunlösliche Moleküle, die zur Bildung von Mizellen (klumpigen Anhäufungen unlöslicher Stoffe) führen können. Als Gegenmaßnahme kommen Netzmittel, sogenannte Tenside zum Einsatz. Diese bestehen aus Molekülen mit einem hydrophilen und einem hydrophoben Ende. Dadurch verbinden sie sich mit allen wasserunlöslichen Molekülen und verhindern die Mizellenbildung. Zudem erhöhen Netzmittelmoleküle an der Werkstückoberfläche die Benetzbarkeit mit Elektrolyt. Diese Eigenschaft ermöglicht das Galvanisieren feiner Kapillaren. Chloride werden letztlich zur Verbesserung der Korrosion der Anode eingesetzt. [96] [105]

3 Optimierung von FLM-Bauteilen

3.1 Stand der Technik

Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Verbesserung der Oberflächenqualität von FLM-Bauteilen. Dazu soll die möglichst einfache Vorgehensweise des Eintauchens in eine Chemikalie eingesetzt werden. Neben der Darstellung bisheriger Forschungsarbeiten zu dieser Methode folgt im Stand der Technik auch die Darlegung alternativer Möglichkeiten, die in wissenschaftlichen Kreisen und Veröffentlichungen zur Diskussion stehen. Die Optimierung von FLM-Bauteilen ist derzeit stark fokussiert auf die Oberflächenqualität. Verantwortlich dafür ist die verhältnismäßig ungünstige Ausgangssituation. Der Treppenstufeneffekt zeigt sich bei FLM-Bauteilen durch die große Schichtstärke und das Prinzip des Auftrags eines Kunststoffdrahtes besonders deutlich. [106] Eine Reduzierung der Schichtstärke bringt zwar eine wesentliche Verbesserung, bedingt durch den langsamen Schichtauftrag bei Verwendung von nur einer Düse steigt die Bauzeit jedoch deutlich an, sodass eine wirtschaftliche Produktion nicht immer gewährleistet ist. Hier zeigt sich ein wesentlicher Vorteil des Poly- oder Multi-Jet Modelings, der sich allerdings auch im Anlagenpreis widerspiegelt [5] [107] [108]. Ein weiterer Aspekt, der im Fokus der Forschung steht, ist die Optimierung der mechanischen Eigenschaften. Die Bestrebungen der Verbesserung von FLM-Bauteilen lassen sich insgesamt grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilen. Zum einen wird versucht durch die direkte Prozessoptimierung entsprechende Ziele zu verfolgen. Dabei spielen Anlagenparameter, wie Temperaturen oder die Rasterung eine entscheidende Rolle. Auch wenn es kein Anlagenparameter im eigentlichen Sinne ist, ist hier auch der für additive Fertigungsverfahren entscheidende Aspekt der Bauteilorientierung inbegriffen. Die zweite Möglichkeit der Optimierung ist die Nachbehandlung fertiger Bauteile, wobei hier alle erdenklichen Methoden des Oberflächenfinish bzw. der Bauteilbearbeitung in Frage kommen, die auch bei konventioneller Fertigung eingesetzt werden. Zu achten ist jedoch auf die Komplexität, die additiv hergestellte Bauteile häufig inne haben sowie die geringe Stückzahl bis hin zur Losgröße eins, welche die Wirtschaftlichkeit vieler Verfahren stark einschränkt.

3.1.1 Prozessoptimierung

Die folgende Zusammenfassung der Aktivitäten hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, soll jedoch einen Überblick über die Möglichkeiten geben. Bei der Prozessoptimierung werden meist unterschiedliche Parameterkombinationen und deren Auswirkung auf eine Zielgröße untersucht. Zum Einsatz kommen dabei statistische Auswertungen, wie beispielsweise die Versuchsmethodik nach Taguchi. Als wesentliche Ein-

flussfaktoren für die Oberflächenqualität eines Bauteils werden Orientierung, Spurabstand, Schichtstärke und Auftragsgeschwindigkeit, sowie Bahnverlauf und Rotation um die z-Achse genannt. [12] [13] [14] [15] Einige Untersuchungen setzen sich vorwiegend mit der Schichtstärke auseinander. Dabei sind die Ergebnisse meist nicht nur auf das FLM zu beziehen. Auf Basis von ausgiebigen Studien zur Oberflächenqualität in Abhängigkeit des Neigungswinkels werden Rechenmodelle aufgestellt, die eine Vorhersage ermöglichen. [10] [47] [48] [49] [109] [110] Ähnliche Betrachtungen erfolgen hinsichtlich der Maßhaltigkeit. So sollen richtungsabhängige Schrumpffaktoren die Maßhaltigkeit begünstigen, da innerhalb der Ebene meist ein Untermaß, in z-Richtung jedoch ein Übermaß vorliegt. [111] [112] [113] Auch hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften werden Untersuchungen angestellt. Dabei liegt der Fokus auf der Rasterorientierung, also dem Muster, in dem die Materialbahnen in jeder Schicht abgelegt werden bzw. den Variationen von Schicht zu Schicht. Die Anisotropie der Bauteile durch das Schichtprinzip ist dabei von zentraler Bedeutung, um ein besseres Prozessverständnis zu erlangen. Der Zusammenhalt innerhalb einer Schicht ist weit höher als von Schicht zu Schicht. Es kann festgehalten werden, dass die bestmöglichen Einstellungen und Orientierungen stark vom Belastungs- und Anwendungsfall abhängig sind. [114] [115] [116] [117] [118] [119] [120] [121] Die vielen unterschiedlichen Einflüsse machen es für den Privatanutzer sehr schwierig, die Möglichkeiten des FLM optimal zu nutzen. Nicht nur ein ausreichendes Prozessverständnis, auch der Zugang zu wissenschaftlicher Literatur und notwendigen Tools fehlen meist. Ebenso für die industrielle Anwendung in Unternehmen, in denen die Technologie eingeführt wird, stellt die Vielzahl der Einflüsse ein Problem dar. Zudem bieten viele Anlagen gar nicht die Möglichkeit entsprechende Einstellungen vorzunehmen, was es gerade Einsteigern in dieser Technologie schwer möglich macht, das gesamte Potential auszuschöpfen.

3.1.2 Bauteil Finishing

Zur Verbesserung der Oberflächenstruktur kommen viele Verfahren zum Einsatz, die jedoch in der Anwendung an den oft komplexen Strukturen additiv hergestellter Bauteile scheitern. Stratasys stellt Möglichkeiten zur Vorbehandlung für das Lackieren und zum Abdichten der Bauteile gegenüber flüssigen Medien vor. Darunter fällt zum Beispiel das Behandeln mit Epoxidharz in Form einer Beschichtung sowie die Infiltration oder das Schleifen. Zudem wird das sogenannte „Part Dipping“, also der in dieser Arbeit gewählte Ansatz beschrieben. Die Auswirkungen auf die Bauteile bleiben dabei unklar. [16] [17] [18] Eine nähere Betrachtung der Auswirkungen der einfachen Vorgehensweise des Eintauchens von Bauteilen in Chemikalien erfolgt durch Galantucci et al., Percoco et al. sowie Mireles et al. in ersten Untersuchungen. Galantucci nutzt dabei zunächst eine auf „Trial and Error“ Basis ermittelte Lösung aus 10 %

Wasser und 90 % Aceton bei einer Wirkdauer von 300 s. Betrachtet werden lediglich Flächen mit einer Orientierung von 0° und 90°, bei denen sich eine wesentliche Glättung einstellt. Zudem stellt er eine Gewichtszunahme von nur 1 % bei einer Reduzierung der Außenmaße um ebenfalls 1 % fest. [19] Es folgt eine Untersuchung der Zug- und Biegeeigenschaften unter gleichen Nachbehandlungsbedingungen. Dabei werden nur liegende Proben hergestellt (pro Parametersatz lediglich drei) und die Behandlungszeit zwischen 180 und 420 s variiert. Genau wie bei den Oberflächenuntersuchungen werden die Ergebnisse durch variable Prozessparameter überlagert. Insgesamt ist eine geringe Senkung der Zugfestigkeit bei einer leichten Steigung der Dehnbarkeit und Biegefestigkeit festzustellen. [20] Am selben Institut folgt Percoco mit einer Analyse des Einflusses auf die Druckfestigkeit. Ebenfalls unter Variation verschiedener Prozessparameter sowie der Einwirkzeit des Acetons stellt er eine geringfügige Erhöhung der Druckfestigkeit bei Einwirkzeiten von 180 und 300 s fest. Bei 400 s hingegen versagt das Bauteil wesentlich früher. Auch Percoco betrachtet dabei lediglich eine Aufbaurichtung und schließt mit seiner Veröffentlichung die Untersuchungen ab. [21] Ende 2012 veröffentlicht Rao eine Studie, in der er aufbauend auf Galantucci et al. mithilfe der Taguchi Methode die Parameter Konzentration, Temperatur, Ausgangsrauheit und Einwirkzeit analysiert. Zudem betrachtet er neben Aceton auch Methylethylketon als weiteres Wirkmedium. Konzentration und Temperatur stellen sich dabei als wesentliche Faktoren heraus, wobei dies bei einem so enormen Unterschied der betrachteten Temperaturen (Raumtemperatur und 55 °C, also nahe dem Siedepunkt) zu erwarten ist. Hinsichtlich der Rauheit, gemessen nur in 0° und 90° bzw. an nicht definierten Freiformflächen durch nicht definierte Methoden, konnten erhebliche Verbesserungen festgestellt werden, während die Maßhaltigkeit nur gering beeinflusst wird. Scheinbar erfolgen die Versuche mit unterschiedlichen Farben, was nicht in der Auswertung berücksichtigt wird. Die Betrachtung weiterer Auswirkungen erfolgt nicht. [22] Die Beeinflussung der Dichtheit von FLM-Bauteilen untersuchen Mireles und McCullough. Mireles et al. betrachten dabei verschiedene Dichtmittel und die Infiltration. Dadurch können Bauteile gegenüber Luft bei erhöhtem Druck abgedichtet werden. [23] McCullough untersucht die Dichtheit gegenüber Wasser nach einer Behandlung eines nach oben offenen und nur zwei Schichten hohen Kanals. Als Resultat ist festzuhalten, dass das eingefärbte Medium bei unbehandelten Kanälen in Randbereiche des Bauteils fließt, bei behandelten jedoch im Kanal bleibt. [24] Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkung einer chemischen Behandlung von FLM-Bauteilen auf irgendein Bauteilmerkmal sind nach aktuellem Recherchestand nicht bekannt.

Zuletzt soll eine kommerzialisierte Lösung der Firma Stratasys vorgestellt werden. Zur Verbesserung der Bauteiloberfläche bietet der Anlagenhersteller eine Nachbearbeitungsvorrichtung an. Schon 2005 erfolgte die Patentierung der Vorgehensweise

[122] und 2009 die der dafür vorgesehenen Vorrichtung [123]. Die sogenannte „Finishing Touch Smoothing Station“ besteht aus einer Kammer zur Nachbehandlung und einer weiteren zur Aushärtung. Durch das sogenannte „vapor-honing“ (Dampfhonen) wird das Bauteil durch ein erhitztes Fluid, dessen Dampf am Bauteil aufsteigt, geglättet. Der Dampf kondensiert am kalten Bauteil und sorgt dort für den Angriff der Oberfläche. In der Trockenkammer kann das Fluid endgültig verdampfen, wodurch eine geglättete Oberfläche entsteht. Die Anlage ist ausschließlich für ABS konzipiert. Die Ausprägung der Glättung ist nicht kalkulierbar. Somit ist für das gewünschte Ergebnis ein mehrmaliges (2 bis 4) Durchlaufen der 10 bis 30-sekündigen Behandlung und der 30 bis 45-minütigen Trocknung notwendig. Die Durchhärtung des Bauteils dauert 12 bis 18 Stunden. [124] [125] [126] Als einsetzbare Medien gibt Stratasys die Produkte Vertrel SDG der Firma DuPont und SSF (Smoothing Station Fluid) der Firma MicroCare an. Beide Chemikalien bestehen zu 80 bis 83 bzw. 60 bis 100 % aus 1,2-trans-Dichlorethylen. [127] [128] Das Einatmen oder Verschlucken dieses Stoffes kann zu Reizungen, Narkose, Krämpfen, Koma, Atemlähmung, Leber- oder Nierenschädigungen führen. Zudem ist es leicht entzündbar und führt durch offene Flamme zur Phosgenbildung, welches durch Inhalation zur Bildung eines toxischen Lungenödems führt. [129] Stratasys weist auf Produktinformationen der Smoothing Station auf die Beachtung lokaler Gesetzgebungen zum Gebrauch industrieller Lösungsmittel hin. [125] [126] Nach 2. Bundesimmissionsschutzverordnung darf 1,2-trans-Dichlorethylen nicht in Oberflächenbehandlungsanlagen (z. B. zur Reinigung von Gegenständen oder Materialien) verwendet werden. [130] Der Einsatz der Anlage in Verbindung mit den vorgesehenen Mitteln scheint demnach in Deutschland fraglich. Zudem ist der Einsatz für den Privatgebrauch nahezu ausgeschlossen. Quantitative Aussagen über die Auswirkungen der Anwendung sind kaum vorhanden. Stratasys bezieht sich auf eine von der Universität in Texas-El Paso durchgeführte Studie an 6 Bauteilen, die eine Änderung der Maße von 0,023 mm und eine Glättung um das 10 bis 15-fache bescheinigt. [125] [126] Aufbauend auf der Anlage von Stratasys gehen derzeit Ratschläge durch die Presse und das Internet, die empfehlen, FLM-Bauteile in einen Topf zu hängen und Aceton in diesem Topf zu erhitzen. Aufgrund der leichten Entflammbarkeit und der schädlichen Wirkung von eingeatmetem Aceton sollte davon eher abgeraten werden. Wissenschaftliche Untersuchungen der Bauteileigenschaften durch diese Anwendung sind nicht vorhanden. [131]

3.2 Systematik der Bauteiloptimierung

Bei der Optimierung bzw. Nachbehandlung von Bauteilen können, bezogen auf den Anwendungsfall, unterschiedliche Anforderungen bestehen. Auf den damit in Verbin-

den stehenden Begriff der Qualität sowie die Vorgehensweise der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche wird im Folgenden eingegangen.

3.2.1 Qualitätsmerkmale eines Bauteils

Gemäß DIN EN ISO 9000 wird Qualität als Grad verstanden, in dem Merkmale einer Einheit festgelegte und üblicherweise vorausgesetzte bzw. verpflichtende Erfordernisse oder Erwartungen erfüllen. Die Erfordernisse und Erwartungen sind dabei durch eine Organisation bzw. ihre Kunden und andere interessierte Parteien vorgegeben. [132] Demnach ist die Qualität eines Bauteils ein sehr individueller Begriff, der nicht vorgegeben für ein Verfahren definiert werden kann. Zwar sind die Qualitätsmerkmale grundsätzlich gleich, deren Ausprägung jedoch entsprechend unterschiedlicher Nutzer und Anwender verschieden. Die durch VDI Richtlinie 3404 vorgenommene Eingliederung der additiven Fertigungstechnologien in Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT) und Rapid Manufacturing (RM) zeigt auch, wie unterschiedlich die Ansprüche an ein Bauteil sein können. Während beispielsweise Konzeptmodelle in einem frühen Stadium der Entwicklung lediglich Anforderungen an die Anmutung eines Bauteils stellen, erfordert ein Technischer Prototyp bereits nahezu Serienqualität. [7] Das zurzeit noch vorrangig im RP und Hobbysektor eingesetzte FLM weist innerhalb der additiven Fertigungsverfahren die schlechtesten Oberflächen auf. Neben diesen Bereichen findet allerdings eine zunehmende Verbreitung in weit anspruchsvollere Marktsegmente, wie der Automobil-, Luftfahrt- oder Medizinindustrie statt. Dort sind die Anforderungen zum Beispiel an gute Oberflächen weit ausgeprägter. Um eine steigende Verbreitung des FLM zu ermöglichen, sollte der Fokus in einer Optimierung zunächst auf der Oberflächenqualität liegen. [51] Sämtliche andere Werkstoffeigenschaften sind dabei mindestens auf gleichem Niveau zu halten bzw. nach Möglichkeit zu verbessern. Dabei ist zwischen unterschiedlichen Anwendungsfällen zu unterscheiden. Welche Anforderungen gestellt werden, hängt wie geschildert vom Einsatz ab. Eine spätere Betrachtung von FLM-Bauteilen in der Galvanoformung beispielsweise stellt nur sehr geringe Anforderungen an die Festigkeit, jedoch hohe an die Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit. Dichte oder Farbtreue spielen dabei keine Rolle, die Härte nur eine sehr untergeordnete.

3.2.2 Vorgehensweise der Versuche

Zur Verbesserung der Eigenschaften von FLM-Bauteilen soll in dieser Arbeit das Eintauchen in Chemikalien eingesetzt und die Auswirkungen untersucht werden. Dazu sind zunächst geeignete Mittel anhand von Literaturlauswertungen zu ermitteln, deren Wirksamkeit in einfachen Experimenten zu überprüfen ist. Nach der Auswahl erfolgt die quantitative Auswertung auf die Oberflächenqualität, als ausschlaggebendes Merkmal. Es folgt die Betrachtung weiterer Eigenschaften der Kategorien Maß- und

Formhaltigkeit sowie mechanische Kennwerte. Die Vorgehensweise ist bei allen Merkmalen wie folgt:

- Konstruktion einer geeigneten Probekörpergeometrie
- Herstellung der Probekörper
- Vermessung in unbehandeltem Zustand bei direktem Vorher-Nachher-Vergleich (wenn möglich)
- Nachbehandlung mithilfe der unterschiedlichen Chemikalien
- Trocknungszeit (mindestens 24 h, falls nicht anders angegeben)
- Vermessung in nachbehandeltem Zustand

Die zu prüfenden Eigenschaften sind mit ihrer Methodik bzw. den betrachteten Normen in Tabelle 3-1 dargestellt. Entsprechend dem Aufbau der Arbeit wird unterteilt in Einflüsse auf die Oberfläche, die Form- und Maßhaltigkeit und ausgewählte mechanische Eigenschaften. Die Versuche erfolgen chronologisch in der Reihenfolge des Auftretens in der Tabelle. Dabei werden zur Bestimmung der zentralen Größe, der Oberflächenrauheit, alle ausgewählten Chemikalien überprüft. Für die weiteren Prüfungen erfolgt eine Einschränkung auf drei Wirkmedien. Grundsätzlich ist eine DIN-konforme Messung angestrebt, jedoch nicht immer möglich. Bei Abweichungen zur Norm wird darauf geachtet, dass konstante Bedingungen herrschen und somit eine Vergleichbarkeit gegeben ist. Ziel ist nicht das Aufstellen absoluter Werte, beispielsweise in Form eines Datenblattes, sondern ein Vorher-Nachher-Vergleich.

Tabelle 3-1: Vorgehensweise zur Qualitätsbetrachtung

	Untersuchte Eigenschaft	Methodik bzw. Norm
Einfluss auf die Oberfläche	Oberflächenrauheit	Messung durch Tastschnittverfahren DIN EN ISO 4287 DIN EN ISO 4288
	Farbe	Digitale Ermittlung der CIELAB-Werte
Einfluss auf die Form- und Maßhaltigkeit	Formhaltigkeit	Digitalmikroskopie und digitale Vermessung
	Maßhaltigkeit	Vermessung mit analogen Messmitteln
Einfluss auf mechanische Eigenschaften	Härte	Shore D Bestimmung mit einem Durometer DIN EN ISO 868
	Zugeigenschaften	Zugprüfungen DIN EN ISO 527
	Eindringtiefe	Begutachtung von REM-Aufnahmen
	Dichte	Messung mit Digitalwaage; analoge Messtechnik
	Gasdichtheit	Massenspektrometrische Leckdetektion DIN EN 1779

3.2.3 Einflüsse auf die Versuchsergebnisse

Für eine aussagekräftige Beurteilung der Chemikalieneinwirkung müssen die Messergebnisse möglichst frei von unerwünschten Einflüssen sein, welche zunächst zu identifizieren sind. Dazu ist das Heranziehen der 5-M-Methode ratsam. Demnach werden Prozesse vorrangig durch die Maschine, den Menschen, das Material, die Methode und die Mitwelt beeinflusst. [133] [134] [135] Relevant ist dabei, dass die Einflussgrößen innerhalb einer Versuchsreihe identisch bleiben. Zwischen einzelnen Versuchen bzw. der Betrachtung unterschiedlicher Bauteileigenschaften kann ein Variieren toleriert werden bzw. ist teilweise durch Vorgaben in Normen oder die Gegebenheiten vor Ort notwendig. Die relevanten Einflüsse sind im Folgenden genannt.

Maschine

Die Herstellung aller Probekörper erfolgt mit der Anlage Dimension 1200es SST der Firma Stratasys. Maschineneinstellungen, Standort der Anlage sowie Vorgehensweise bei der Herstellung bleiben bei allen Versuchen gleich. Der Einfluss der Maschine ist ausschließlich auf reguläre Prozessschwankungen beschränkt, welche durch die je nach Prüfung vorgegebene Anzahl an Bauteilen berücksichtigt wird. Alle Parameter bleiben konstant, also die Verarbeitungstemperaturen, die Materialfüllung (die Anordnung der Materialbahnen) und die Schichtstärke. Der wesentliche Parameter der Bauteilorientierung bleibt ebenfalls für alle Bauteile einer Versuchsreihe gleich bzw. wird variiert und dabei explizit gewählt und entsprechend ausgewertet.

Mensch

Der Einfluss durch den Menschen ist bei der Herstellung der Bauteile bei Einhalten der vorgegebenen Orientierungen nicht relevant, da die einzige weitere Möglichkeit den Prozess zu beeinflussen das Einstellen der Maschinenparameter ist, was nicht stattfindet. Bei der Nachbehandlung ist die Auswirkung des Menschen weit größer. Durch Ungenauigkeiten in der Behandlungszeit, starke Bewegungen während des Eintauchvorganges oder von Bauteil zu Bauteil unterschiedliches Handhaben während des Trocknungsvorganges kann es zu Schwankungen des Ergebnisses kommen. Das Risiko wird dadurch reduziert, dass eine abgeschlossene Versuchsreihe von einer Person durchzuführen ist. Dabei wird für jedes Bauteil eine identische und gleichlange Schwenkbewegung beim ersten Verflüchtigen der Chemikalie durchgeführt, um ein starkes Verlaufen zu vermeiden. Ungenauigkeiten bei manuellen Messungen werden durch dreimaliges Messen je Kennwert kompensiert. Bei zu großen Schwankungen erfolgt die Wiederholung der Messreihe, um Messfehler auszuschließen sowie eine weitere genaue Betrachtung, sollte es sich nicht um einen Messfehler, sondern tatsächliche um derart große Schwankungen am Bauteil handeln.

Material

Hinsichtlich des Materials kann ein Einfluss nahezu ausgeschlossen werden. Die Herstellung erfolgt mit gleichem Material, aus der gleichen Farbe und aus derselben Bestellung. Zudem wird für Versuche gleicher Art darauf geachtet, dass mit einer Materialkassette gearbeitet wird. Der Einfluss von Farbmitteln auf die chemische Beständigkeit und somit die Auswirkung des Eintauchens ist sehr komplex. Aufgrund der hohen Anzahl möglicher Kombinationen aus Farbstoffen ist dieser nicht eindeutig zu beurteilen und kaum vorhersehbar. [58] Daher werden alle Versuche mit der Farbe Blau durchgeführt. Auf diese Problematik wird in Kapitel 4 in Zusammenhang mit dem Auflösen von FLM-Bauteilen näher eingegangen. Die verwendeten Chemikalien werden aus gleichen Bezugsquellen erworben und für jedes nachbehandelte Bauteil erfolgt der Wechsel des Mediums. Ein Sättigungsverhalten ist somit ausgeschlossen.

Methode

Auf die Methode, also beispielsweise die Arbeitsweise wurde schon unter „Mensch“ eingegangen. Durch strikte Vorgaben ist gewährleistet, dass die Einflüsse möglichst gering sind. Dabei ist die generelle Auswirkung der Methode nicht relevant, solange diese konstant bleibt.

Mitwelt

Die Mitwelt, also Umwelt- und Umgebungseinflüsse spielen bei der Herstellung der Bauteile eine untergeordnete Rolle. Durch die geschlossene Prozesskammer der verwendeten Anlage kann der Bauraum unabhängig von der Umgebungstemperatur auf einem konstanten Wert gehalten werden. Auch das Abkühlen der Bauteile erfolgt im Bauraum, was Schwankungen reduziert. Bei der Lagerung, Nachbehandlung und bei den Messumgebungsbedingungen sind die Einflüsse größer. Durch die örtlichen Gegebenheiten ist eine Konditionierung und Lagerung nach DIN EN ISO 291 [136] außer bei den extern durchgeführten Zugprüfungen nicht möglich. Da es sich bei den Messungen jedoch immer um vergleichende Messungen handelt und die einzelnen Bauteilserien grundsätzlich bei identischem Klima gelagert und geprüft werden, ist dieser Aspekt zu vernachlässigen. Auch die Lagerung der nicht behandelten Proben erfolgt immer zusammen mit den nachbehandelten Proben.

3.3 Chemikalienvorauswahl

Um nun eine Auswahl an Behandlungsmitteln zu treffen, sind zwei Kernaspekte zu berücksichtigen. Zum einen die Beständigkeit des Kunststoffes und zum anderen die Auswirkung auf den Menschen bzw. die Umwelt. Beide Aspekte werden betrachtet, um eine Auswahl von zehn Medien zu treffen, mit denen die Versuche erfolgen.

3.3.1 Beständigkeit von Kunststoffen gegenüber Chemikalien

Die chemische Beständigkeit, seit einigen Jahren auch als Widerstandsfähigkeit betitelt [58], ist für Kunststoffe im Vergleich zu anderen Werkstoffklassen im Allgemeinen hoch [137]. Der Angriff von Medien läuft dabei völlig anders ab als beispielsweise bei Metallen, bei denen die Vorgänge in der Regel an der Werkstückoberfläche passieren. Bei Kunststoffen kommt es zum Eindringen in das Bauteilinnere. Zu erklären ist dieser Zusammenhang unter anderem mit den um das 100- bis 1000-fach geringeren zwischenmolekularen Nebenvalenzbindungen. Die Beständigkeit ist grundsätzlich von der Zusammensetzung des Kunststoffes (inklusive Zusätze) und der Chemikalie sowie den Einwirkbedingungen abhängig. [58] Dabei wird zwischen beständig, bedingt beständig und nicht beständig unterschieden. Diese Einteilung hat sich in der Industrie durchgesetzt und wird zur Klassifizierung verwendet. [58] [138]

Bei den Chemikalien wird hinsichtlich der Beständigkeit zwischen anorganischen, organischen und sonstigen Substanzen unterschieden. Für die Nachbehandlung von ABS Bauteilen kommen vor allem die organischen Mittel in Frage, welche die Gruppe der Lösungsmittel darstellen. Ein chemischer Angriff des Kunststoffes findet bei anorganischen Medien in der Regel nicht statt, jedoch eine starke Solvation, also zunächst ein Eindringen des Mediums in das Polymergefüge und in mikroskopische Fehlstellen oder Lunker, gefolgt von der Anlagerung der Medienmoleküle an die Makromoleküle des Kunststoffes. Diese durch zwischenmolekulare Kräfte induzierte Bindung (bei (erheblich) polaren Kunststoffen, wie ABS [137] [139] durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen) bewirkt ein „Einhüllen“ der Kunststoffmakromoleküle, wodurch die Bindungskräfte unter Erhöhung des Molekülabstandes abnehmen und die Beweglichkeit der Makromoleküle steigt. Folgen einer solchen Einwirkung können die Reduzierung der mechanischen Eigenschaften, wie beispielsweise E-Modul, Härte und Festigkeit sowie Quellung oder Änderung der Dimension oder Farbe sein. Diese meist ausschließlich physikalischen Vorgänge sind reversibel, können also nach Trocknung zu mehr oder weniger unveränderten Eigenschaften führen. [58]

Als Maßstab der Löslichkeit kann für eine grobe Abschätzung die Struktur- und Dipolähnlichkeit herangezogen werden, auch wenn die Prozesse von vielen weiteren Faktoren abhängig sind und die sehr komplexen Vorgänge bei der Beeinflussung von Kunststoffen durch Chemikalien bis heute nicht hinreichend geklärt sind. So werden die Faktoren Modifizierungsmittel, Füllstoffe, Pigmente oder Stabilisatoren nicht weiter berücksichtigt, da deren Verhalten gegen Einwirkung von Angriffsmedien nicht klar ist. Die Beurteilung der Löslichkeit eines Stoffes ist mithilfe der Kohäsionsenergiedichte anzunähern. Sie erfolgt anhand Gleichung 3.1 [58]

$$\varepsilon = \frac{\Delta H_m}{V_m} = \delta^2 \quad (3.1)$$

mit: ε = notwendige Energie zur Überführung des Moleküls aus der kondensierten Phase ins Vakuum
 ΔH_m = Verdampfungsenthalpie
 V_m = Molvolumen
 δ = Löslichkeitsparameter

Angegeben werden die Löslichkeitsparameter oft einheitslos oder in $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})^{1/2}$ bzw. $\text{MPa}^{1/2}$. Bei sehr niedrigen Werten sollte darauf geachtet werden, dass nicht die ebenfalls verwendete Einheit $(\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2})^{1/2}$ angegeben ist. Diese lässt sich mit dem Faktor 2,05 umrechnen. [140] [141] Je geringer der Unterschied der Löslichkeitsparameter von Kunststoff und Chemikalie ist, desto schlechter ist die Beständigkeit. Löslichkeitsparameter für die meisten Chemikalien sind in der Literatur zu finden. Für Kunststoffe ist dies aufgrund der vielen verschiedenen Zusammensetzungen anders. Da es sich nicht um niedermolekulare Substanzen handelt, ist der Löslichkeitsfaktor aufgrund der fehlenden Verdampfbarkeit nicht durch Gleichung 3.1 berechenbar. [142] Nach Fedors kann die Kohäsionsenergiedichte, welche das Quadrat des Löslichkeitsparameters ist, durch die Gruppenbeitragsmethode bestimmt werden. Dabei ist die Kenntnis über die genaue Zusammensetzung des Feststoffes notwendig. [143] Die Mengenanteile der einzelnen Bestandteile können jedoch bei ABS für Acrylnitril zwischen 15 und 35 %, für Butadien zwischen 5 und 30 % und für Styrol zwischen 40 und 60 % liegen [144] und sind maßgeblich für die chemische Beständigkeit verantwortlich. [138] Da keine Herstellerangaben verfügbar sind, ist die Bestimmung des Parameters nicht möglich.

Der beschriebene Löslichkeitsparameter nach Hildebrand stößt aufgrund sehr stark vereinfachender Annahmen schnell an seine Grenzen. Es ist beispielsweise möglich, dass zwei Chemikalien mit identischen Löslichkeitsparametern auf einen Kunststoff völlig unterschiedlich wirken, der Kunststoff also gegenüber dem einen beständig und dem anderen unbeständig ist. Eine Erweiterung des Parameters erfolgt durch Hansen. Der Löslichkeitsparameter nach Hildebrand wird in drei partielle Löslichkeitsparameter entsprechend Gleichung 3.2 unterteilt. [140] [145]

$$\delta^2 = \delta_D^2 + \delta_H^2 + \delta_P^2 \quad (3.2)$$

mit: δ = Löslichkeitsparameter
 δ_D = dispersiver Löslichkeitsparameter
 δ_H = wasserstoffbrückenbindender Löslichkeitsparameter
 δ_P = polarer Löslichkeitsparameter

Auch die partiellen Parameter sind für die meisten Chemikalien in der Literatur verfügbar. Die Bestimmung für Kunststoffe beruht nach Hansen auf Löslichkeits- oder

Quellversuchen mit 40 bis 45 gezielt ausgewählten Lösungsmitteln. Auf Basis der Einschätzung der Löslichkeit und den Literaturangaben der Mittel kann eine graphische Bestimmung der Parameter für einen Kunststoff erfolgen. [140] [145] Eine solche Bestimmung ist nicht Ziel der durchzuführenden Versuche, was die Auswahl der Chemikalien anhand der Löslichkeitsparameter ausschließt. Zudem ist für eine erste Auswahl lediglich der Einfluss auf die Oberfläche relevant. Eine möglichst hohe Unbeständigkeit des ABS gegenüber einem Medium und somit ähnliche Löslichkeitsparameter, müssen nicht zwingend zu einer idealen Oberfläche führen.

Um dennoch eine geeignete Auswahl an Chemikalien für die folgenden Versuche treffen zu können, werden zunächst unterschiedliche Herstellerangaben zur Beständigkeit von ABS gegenüber Chemikalien betrachtet. Durch die Zuhilfenahme der Angaben der Firma Ahlborn Kunststoffe [146] sowie der Firma Rehau [147] erfolgt eine Gegenüberstellung von 97 Chemikalien auf die ABS laut Hersteller unbeständig reagiert. Eine erste Reduzierung der Anzahl kann durch den Zusatz der Löslichkeit durchgeführt werden. Für ca. 60 % der ausgewählten Mittel ist eine solche Angabe nicht vorhanden. 21 der übrigen Mittel erfüllen laut Herstellerangaben das Kriterium des Auflösens von ABS und werden für die weitere Betrachtung herangezogen.

3.3.2 Betrachtung der Sicherheits- und Gesundheitsrisiken

Eine weitere Einschränkung bietet die Berücksichtigung von Sicherheits- und Gesundheitsrisiken, die bei der Auswahl der Chemikalien eine entscheidende Rolle spielen. Für einen sicheren Umgang sind neben der Gefahrstoffverordnung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin auch die Sicherheitsdatenblätter der Hersteller zu beachten. [130] In der Regel weisen diese folgende Kapitel auf:

- Charakterisierung
- Toxikologie/Ökotoxikologie
- Physikalisch-chemische Eigenschaften
- Arbeitsmedizin und Erste Hilfe
- Umgang und Verwendung
- Vorschriften

Zudem sind in Datenblättern die Risiko- und Sicherheits-Sätze (R- und S-Sätze) der jeweiligen Materialien vermerkt. R-Sätze beschreiben dabei Hinweise auf besondere Gefahren während S-Sätze Sicherheitsratschläge für die jeweilige Chemikalie sind. [148] [149] Auch in Bezug auf die Anwendung von FLM-Anlagen in privaten Haushalten und dem auch dort verbundenen Wunsch nach besseren Oberflächenstrukturen sind die R- und S-Sätze wesentlicher Bestandteil der Chemikalienvorauswahl. Dazu werden den einzelnen Sätzen subjektiv Punkte zwischen 1 und 100 zugeteilt. Die

Zahl steigt mit der Schwere des Risikos. Satz R8 besagt beispielsweise „Feuergefahr bei Berührung mit brennbaren Stoffen“ und wird mit 5 bewertet. R39 mit der Aussage: „Ernsteste Gefahr irreversiblen Schadens“ hingegen bekommt die höchst mögliche Punktzahl 100. Gesundheitsbeeinträchtigende Wirkungen haben meist besonders hohe Bewertungen, während leicht zu vermeidende Risiken eher gering eingestuft werden. Die Summe der einzelnen Risikobewertungen darf den Wert 100 nicht überschreiten und sollte so niedrig wie möglich bleiben. Eine Gesamtübersicht der Bewertung ist dem Anhang zu entnehmen. Das Resultat dieser Einschränkung sind elf verbleibende Chemikalien, die für die weitere Betrachtung in Frage kommen. Davon wird jedoch Pentylacetat aufgrund des hohen Preises von 90 €/l nicht weiter berücksichtigt. [150] [151]

3.3.3 Ausgewählte Einwirkmedien

Tabelle 3-2 zeigt eine Übersicht der ausgewählten Stoffe. Zu den in [146] und [147] genannten Bezeichnungen sind der Vollständigkeit halber exemplarisch Alternativbezeichnungen nach Gefahrstoffinformationssystem (GESTIS) sowie die Zuordnung zu Stoffgruppen gegeben. [150]

Tabelle 3-2: Ausgewählte Chemikalien und deren Einordnung

	Alternativbezeichnung nach GESTIS	Stoffgruppe
4-Methyl-2-pentanon	Isobutylmethylketon Hexon	Keton
Aceton	Ketopropan Methylacetyl	Keton
Chlorbenzol	Benzolmonochlorid Phenylchlorid	Halogenkohlenwasserstoff, aromatisch
Decahydro-naphthalin	Decalin Naphthan	Kohlenwasserstoff, cyclisch, gesättigt
Diethylether	Diethyloxid Vitrioether	Ether
Ethylacetat	Essigester Essigether	Carbonsäureester
Ethylmethylketon	Butanon MEK	Keton
m-Xylol	1,3-Dimethylbenzol	Kohlenwasserstoff, aromatisch
Tetrachlorethylen	Per Perchlorethylen	Halogenkohlenwasserstoff, aliphatisch, ungesättigt
Toluol	Methylbenzol Toluen	Kohlenwasserstoff, aromatisch

Es fällt auf, dass die ausgewählten Mittel unterschiedlichen Stoffgruppen zugehören. Aus der Literatur sind grundlegende Aussagen zur Beständigkeit verschiedener Kunststoffe gegenüber einzelnen Stoffgruppen bekannt. ABS wird dabei als beständig gegenüber Wasser, wässrigen Salzlösungen, verdünnten Säuren und Alkalien, gesättigten Kohlenwasserstoffen und vielen pflanzlichen und tierischen Fetten und Ölen eingestuft. Unbeständig hingegen ist es gegenüber aromatischen und chlorierten Kohlenwasserstoffen, Estern, Ketonen und Ethern. Weiter gilt es als unbeständig gegenüber konzentrierten, mineralischen Säuren und Oxidantien. [58] [138] Zudem wird die Beständigkeit von ABS mit der von Styrol Acrylnitril Copolymerisat (SAN) verglichen. Demnach müsste ABS zudem beständig gegenüber aliphatischen Kohlenwasserstoffen sein. [137]

3.4 Einfluss auf die Oberfläche

Die durch den Treppenstufeneffekt prozessbedingt schlechte Oberfläche ist einer der wesentlichen Nachteile der additiven Fertigungsverfahren. Gerade bei FLM-Bauteilen fällt dieser durch die verhältnismäßig hohen Schichtstärken verstärkt auf. Die verwendete Anlage Dimension 1200es SST der Firma Stratasys arbeitet mit einer Schichtstärke von 254 μm [107]. Im Vergleich zu beispielsweise der des Laser-Sinterns auf einer Formiga P 100 (100 bis 150 μm) der Firma EOS [5] oder der Schichtstärke der Poly-Jet Modeling Anlagen aus der Connex oder Eden Reihe (16 μm) der Firma Stratasys [108], wird deutlich, dass hier großer Handlungsbedarf herrscht. Durch die folgenden Versuche soll dazu beigetragen werden, die Oberflächenqualität durch möglichst einfache und risikoarme Weise zu verbessern. Durch das Lösen der Nebenvalenzbindungen bei Kontakt mit einem Lösemittel geht der Kunststoff in einen breiigen Zustand über. Durch das Bestreben eines Systems zum Erreichen einer möglichst geringen Oberfläche, glättet sich das nun fließfähige Material. Da der Vorgang physikalischer Natur und somit reversibel ist, bauen sich die Dipol-Wechselwirkungen beim Verdunsten des Lösungsmittels wieder auf und der Kunststoff kehrt in seinen Ausgangszustand zurück. [97] [152] [153] Ergebnis ist eine deutliche Reduzierung der strangartigen Struktur und des Treppenstufeneffektes.

3.4.1 Bestimmung der Einwirkzeit

Neben der Chemikalie-Kunststoff-Paarung ist die Einwirkzeit ein wesentlicher Einfluss auf die Beständigkeit [58] [154]. Da die Optimierung der Oberflächenqualität in dieser Arbeit das primäre Ziel der chemischen Nachbehandlung ist, wird diese zur Bestimmung betrachtet. Zweite Priorität sollte auf der Formstabilität und der Maßhaltigkeit des Bauteils liegen. Um in einer ersten Abschätzung die Auswirkung der ausgewählten Angriffsmedien zu beurteilen, erfolgt die Herstellung von einfachen Probe-

körpern. Bild 3-1 zeigt die Maße (a) sowie die generelle Vorgehensweise des Versuches (b).

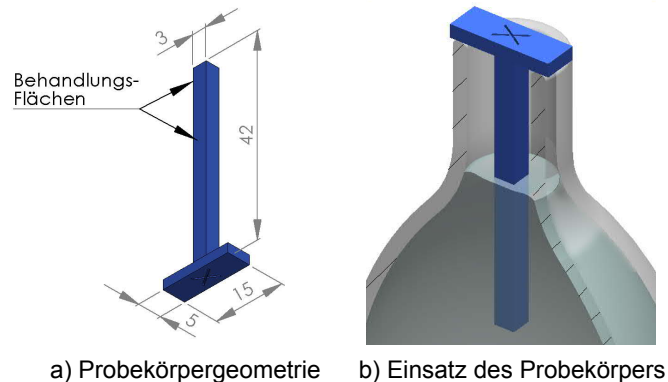


Bild 3-1: Probekörper (a) und Einsatz zur Bestimmung der Einwirkzeit (b)

Der Probekörper wird in eine Flasche gehängt, die bis etwa zur halben Höhe des Probekörpers mit der jeweiligen Chemikalie gefüllt ist. Die Herstellung des Probekörpers erfolgt stehend, also mit der 5 mal 15 mm² großen Grundplatte auf der Bauplattform. So wird außer unterhalb dieser Grundplatte kein Support erzeugt und eine Beeinflussung des ABS durch Support, das Abbrechen oder das Auflösen des Supportmaterials ist ausgeschlossen. Zur Bestimmung der optimalen Einwirkzeit dient die in Bild 3-2 dargestellte Vorgehensweise.

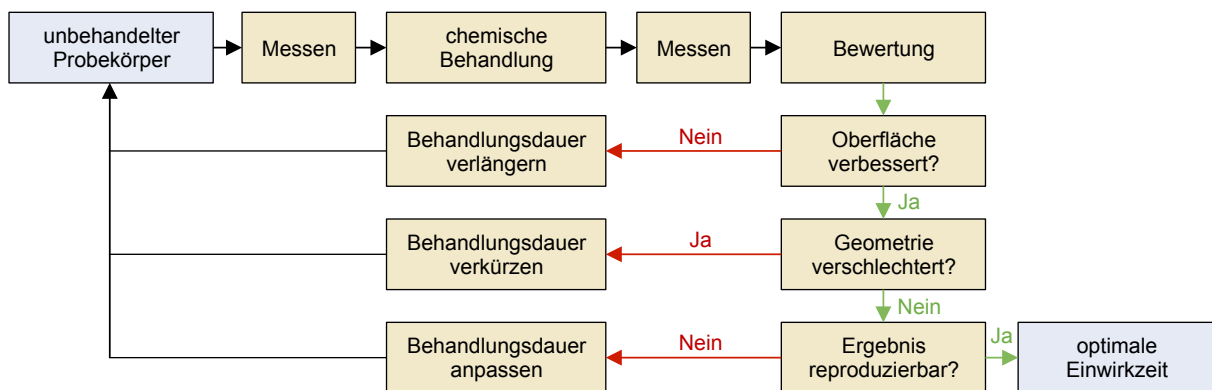


Bild 3-2: Vorgehensweise zur Ermittlung der Einwirkzeit

Der unbehandelte Probekörper ist zunächst zu vermessen, also die Rauheit zu bestimmen. Zudem sollten die verschiedenen Bauteile auf optische Gleichheit untersucht werden. Es folgt die Nachbehandlung mit einer vorher bestimmten Zeit und ein erneutes Messen bzw. Begutachten. Bei erreichter Verbesserung der Oberflächenqualität ist die Formhaltigkeit zu prüfen. Ist diese nicht mehr gegeben, muss die Behandlungszeit verkürzt werden. Erfolgt schon im ersten Schritt keine Verbesserung der Oberfläche oder ist die Oberfläche glatter und keinerlei Formänderung festzustellen, folgt der Versuch einer längeren Einwirkzeit. Abschließend wird durch Wiederho-

lung der ermittelten Zeit die Reproduzierbarkeit festgestellt. Durch das mehrmalige Durchlaufen der Zeitanpassungen soll die für das jeweilige Medium geeignete Einwirkzeit bestimmt werden. Die Messungen finden jeweils nach 24 h Trocknungszeit statt und für die Nachbehandlung werden grundsätzlich frische Lösemittel verwendet. Um einen Ausgangswert für die beschriebene, detaillierte Vorgehensweise zu erhalten und generell die Wirksamkeit der ausgewählten Chemikalien zu prüfen, erfolgt vorab eine Behandlung von Probekörpern mit steigender Dauer, bis eine Reaktion bzw. bestenfalls eine optisch glatte Oberfläche entsteht. Aufgrund von Voruntersuchungen und auf Basis der Arbeiten von beispielsweise Galantucci [19] oder Rao [22] wird mit einer Zeit von 0,25 Minuten begonnen und dann auf 1, 5, 15, 30 bzw. 60 Minuten erhöht. Die Begutachtung erfolgt subjektiv durch Betrachtung der Probekörper. Tabelle 3-3 zeigt eine Übersicht über die Auswirkung der Behandlung.

Tabelle 3-3: Optische Bewertung der Reaktion

	0,25 Minuten	1 Minute	5 Minuten	15 Minuten	30 Minuten	60 Minuten
4-Methyl-2-pentanon	geringe Veränderung	glänzende Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-	-	-
Aceton	sehr glatte Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-	-	-	-
Chlorbenzol	glatte Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-	-	-	-
Decahydronaphthalin	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung
Diethylether	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	Farbveränderung
Ethylacetat	glatte Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-	-	-	-
Ethylmethylketon	sehr glatte Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-	-	-	-
m-Xylol	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	glatte Oberflächen	-	-
Tetrachlorethylen	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung
Toluol	glänzende Oberfläche	geringe Veränderung	sehr glatte Oberfläche	-	-	-

Es wird deutlich, dass bei drei der zehn Chemikalien trotz der Löslichkeit von ABS in und der mangelnden Beständigkeit gegenüber der Mittel keine Reaktion innerhalb von 60 Minuten stattfindet. Zur Veranschaulichung sind die Auswirkungen der für die gewünschte Anwendung ungeeigneten Chemikalien in Bild 3-3 dargestellt. Bei Decahydronaphthalin ist auffällig, dass es sich um einen gesättigten Kohlenwasserstoff

handelt, der laut gängiger Literatur keine Auswirkungen auf ABS hat. Dennoch wird ABS laut Herstellerangaben als unbeständig gegenüber diesem Medium eingestuft. Eine Erklärung liegt darin, dass gesättigte Kohlenwasserstoffe eine derart hohe Bindungsenergie aufweisen, dass eine Reaktion mit Kunststoffen erst bei hohen Temperaturen zu erwarten ist bzw. die Geschwindigkeit der Startreaktion bei Raumtemperatur sehr niedrig ist. [58] Grundsätzlich werden bei Beständigkeitsangaben jedoch keine Zeiten und/oder Temperaturen beschrieben. Demnach ist es durchaus möglich, dass nach einer wesentlich längeren Einwirkung oder erhöhter Temperatur Veränderungen stattfinden. Diethylether führt zu einer leichten Verblässung des ABS. Diese wirkt sich jedoch nicht auf die eigentliche Struktur des Bauteils aus. Wie auch bei Tetrachlorethylen zeigen sich kleine Blasen, die dafür sprechen, dass eine Reaktion stattgefunden hat. Aus wirtschaftlichen Aspekten sind Chemikalien mit einer Einwirkzeit von mehr als 60 Minuten nicht mehr akzeptabel. Aus diesem Grund werden diese drei Chemikalien von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen und nicht genauer betrachtet, nicht zuletzt, um den Versuchsumfang in einem angemessenen Rahmen zu halten.

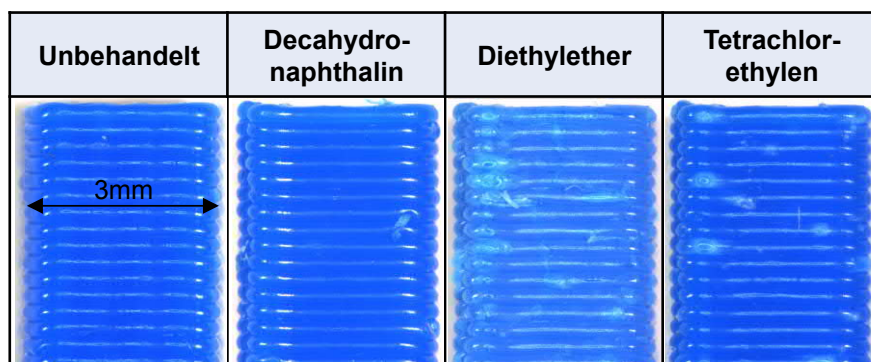


Bild 3-3: Auswirkung ungeeigneter Chemikalien

Die übrigen Chemikalien zeigen eine deutliche Wirkung auf die Probekörper. Auf Basis der optischen Bewertung aus Tabelle 3-3 erfolgt die Bestimmung einer genaueren Zeit anhand der drei Faktoren Rauheit, Formabweichung und Kantenverrundung, wobei die letzten beiden durch optische, subjektive Beurteilung erfolgen. Mit Formabweichung ist dabei die Veränderung entlang der langen Seite des Teststabes gemeint. Kantenverrundung beschreibt die Veränderung in der Ansicht auf die x-y-Ebene. Beide Eigenschaften werden mit einer Scala von null bis fünf bewertet, wobei null dem Ausgangszustand und fünf einer maximalen, unvertretbaren Veränderung entspricht. Bezüglich der Kantenverrundung entspricht dies beispielsweise einer runden Form der 3 mal 3 mm² großen Grundfläche. Die Oberflächenrauheit wird Messtechnisch erfasst. Dazu wird ein Tastschnittgerät gemäß VDI/VDE Richtlinie 2602 verwendet. Mit einer Tastnadel erfolgt die Aufnahme der Oberfläche des Bauteils, des sogenannten Primärprofils. Durch die Anwendung von Filtern werden dann die

geforderten Abweichungen von der Ist-Oberfläche bestimmt. Relevant sind die Abweichungen 3. bis 5. Ordnung nach DIN 4760, wobei sich die 5. Ordnung auf die Gefügestruktur bezieht und somit nicht relevant ist. Die 3. und 4. Ordnung definieren Rillen, Riefen, Schuppen und Kuppen und somit die ungewollten Gestaltänderungen, die es zu erfassen gilt. Der Profilfilter λ_s definiert den Übergang von der Rauheit zu noch kurzwelligeren Abweichungen und filtert diese, während der Filter λ_c den Übergang zur Welligkeit beschreibt. Dieser filtert also alle langwelligen Anteile des Primärprofils, welche nicht zur Rauheit gehören. Das so entstandene Rauheitsprofil ist Grundlage zur Ableitung der beiden zu betrachtenden Kenngrößen Ra und Rz. Ra ist definiert als der arithmetische Mittenrauwert und wird durch den Mittelwert aller Abweichungen von der Soll-Oberfläche beschrieben. Er ist somit nicht anfällig zum Beispiel gegenüber einzelnen Kratzern, da diese den Mittelwert nicht stark beeinflussen. Die mittlere Rautiefe Rz hingegen ist der Mittelwert des Unterschiedes zwischen der größten Profilspitze und des niedrigsten Profiltals einer jeden Messstrecke und ist somit stark abhängig von einzelnen Unebenheiten. Um beides mit in die Bewertung einbeziehen zu können, erfolgt die Betrachtung beider Werte im späteren Verlauf der Arbeit, bei der Bestimmung der Einwirkzeit jedoch nur der von Ra. [155] [156] [157] [158] [159] Die Messungen erfolgen mit dem Tastschnittmessgerät SurfTest SJ-400 der Firma Mitutoyo. Durch eine Vorschubeinheit wird die Tastspitze über die Bauteiloberfläche bewegt, während ein Messaufnehmer die dabei entstehenden Hubbewegungen misst und auswertet bzw. in ein elektrisches Signal umwandelt. Die dazugehörige Software Surfpack-SJ interpretiert die Messung, erzeugt auf Basis von Voreinstellungen das gewünschte Profil und bestimmt die Kennwerte. Die Voreinstellungen erfolgen anhand der Vorgaben nach DIN EN ISO 4288 bzw. 3274 auf Basis der zu erwartenden Messergebnisse. Bei nachbehandelten Flächen werden Ra Werte zwischen 1 und 10 μm erwartet, bei unbehandelten Flächen in Abhängigkeit der Orientierung zwischen 20 und 50 μm . Tabelle 3-4 zeigt auszugsweise die Vorgaben der DIN Normen. [157] [159]

Tabelle 3-4: Messbedingungen für Rauheitsmessungen (Auszug) [157] [159]

Ra [μm]	Messbedingungen			
	r_{Tip} [μm] maximaler Tastspitzenradius	$\lambda_c = l_r$ [mm] Einzelmess- strecke	l_r [mm] Messstrecke	l_r [mm] Messstrecke mit Vor- und Nachlauf
> 0,5...10	2	0,8	4	4,8
> 10...50	5	2,5	12,5	15
>50...200	10	8	40	48

Es ist zu sehen, dass für die zu erwartenden Messergebnisse drei Messbedingungsätze in Frage kommen. Bis auf einige Ausnahmen sollten die Werte für Ra der be-

handelten Bauteile im grün markierten Bereich liegen. Für diese ist demnach eine Tastspitze mit 5 μm sowie eine Einzelmessstrecke von 2,5 mm zu wählen. Durch die vorgegebene Anzahl von 5 Einzelmessstrecken und durch die Vor- und Nachlaufstrecke, die zur Reduzierung des Einflusses der Ein- und Ausschwingphase der Tastnadel dient, ergibt sich somit die Gesamtmessstrecke von 15 mm. Um nun vergleichbare Messergebnisse zu erhalten, werden die gleichen Parameter für die unbehandelten Bauteile verwendet. Zudem erfolgt für jede Messfläche die Durchführung von drei Messungen aus deren Ergebnissen der Mittelwert gebildet wird. Dadurch können einzelne Fehlstellen kompensiert werden und bei der Messung auftretende Fehler fallen bei zu starker Abweichung der einzelnen Messungen auf, was zur Wiederholung bzw. Überprüfung der Messung führt. Die Bestimmung der Einwirkzeit erfolgt entsprechend der alphanumerischen Sortierung und stellt keine Rangliste oder ähnliches dar. Die Vorgehensweise entspricht der Beschreibung in Bild 3-2. Dabei sind in den Abbildungen Bild 3-4 bis Bild 3-12 nicht alle verwendeten und Begutachteten Probekörper dargestellt, sondern lediglich eine Auswahl, die repräsentativ die Ergebnisse verdeutlicht.

4-Methyl-2-pentanon

4-Methyl-2-pentanon zeigt bei den ersten sehr kurzen Versuchen gar keine bis sehr geringe Wirkung auf die Probekörper. Durch eine Erhöhung der Zeit auf zunächst eine Minute beginnt die Oberfläche stark zu glänzen. Die wellige Struktur bleibt jedoch weitestgehend erhalten. Ebenso ist keine Veränderung der Form und der Kantenverrundung festzustellen. Erst bei einer Einwirkzeit von zwei Minuten erfolgt eine deutliche Reduzierung der Rauheit, wobei auch die Form beeinträchtigt wird. Die weitere Erhöhung auf fünf Minuten zeigt dann eine noch deutlichere Glättung. Im Verhältnis zur Oberflächenglättung nimmt bei weiterer Erhöhung der Zeit die Formhaltigkeit derart ab, dass fünf Minuten als bestmöglicher Kompromiss aus negativer Formänderung und positiver Oberflächenbeeinflussung bestimmt wird. Die Ergebnisse sind in Bild 3-4 dargestellt.

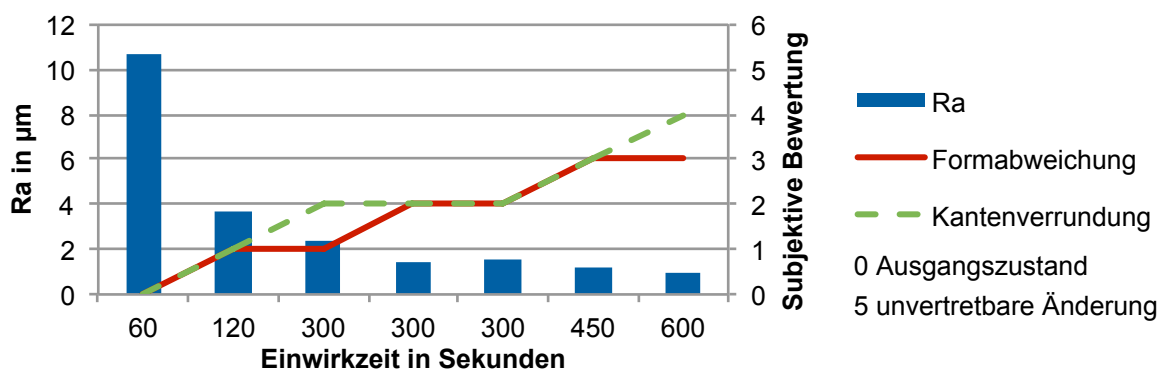


Bild 3-4: Einwirkzeit für 4-Methyl-2-pentanon

Aceton

Schon die Vorversuche zeigen, dass Aceton als zweites Mittel aus der Gruppe der Ketone eine deutlich stärkere Auswirkung auf ABS zeigt. Die Resultate sind in Bild 3-5 verdeutlicht. Schon bei einer Einwirkzeit von 15 Sekunden ist eine Reduzierung von R_a auf unter $2\text{ }\mu\text{m}$ zu messen. Die Formänderungen sind dabei relativ gering. Die Erhöhung der Einwirkzeit bringt eine deutliche Verschlechterung der Form sowie stark schwankende Rauheitswerte mit sich. Diese resultieren vor allem aus der kurzen Einwirkzeit und der Tatsache, dass die Versuche manuell durchgeführt werden. Durch die aggressive Wirkung können schon unterschiedliche Ein- und Austauschgeschwindigkeiten für Schwankungen sorgen. Für spätere Anwendungen resultiert somit für den Einsatz von Aceton eine höchstmögliche Sorgfalt in der Durchführung. Entstehende Ablagerungen von Aceton beim Herausziehen aus dem Medium müssen zwingend vermieden werden. Dabei helfen die durchgeführten Schwenkbewegungen unmittelbar nach dem Auftauchen. Aufgrund der großen Auswirkung auf die Form und Kantenverrundung wird für Aceton eine Einwirkzeit von 15 Sekunden für die späteren Versuche festgehalten. Eine Verlängerung der Zeit ist aufgrund der nicht bzw. kaum weiter sinkenden Rauheit und den immer stärkeren negativen Einflüssen nicht in Betracht zu ziehen.

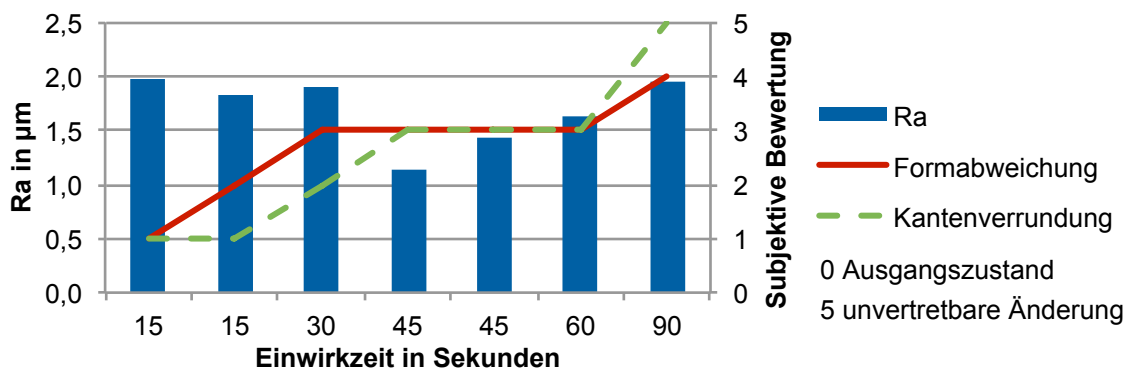


Bild 3-5: Einwirkzeit für Aceton

Chlorbenzol

Auch auf Chlorbenzol reagiert das Material sehr schnell. Laut Literatur ist ABS nicht beständig gegenüber chlorierten und aromatischen Kohlenwasserstoffen. [58] [138] Chlorbenzol ist beides [150] und erwirkt somit eine schnelle Reaktion. Hier ist bei 60 Sekunden der Übergang, bei dem die Oberflächenverbesserung nicht mehr derart steigt, dass die Formänderung akzeptiert werden kann, wie in Bild 3-6 zu sehen ist. Eine Zeit von 45 Sekunden ist demnach für die weiteren Versuche zu verwenden.

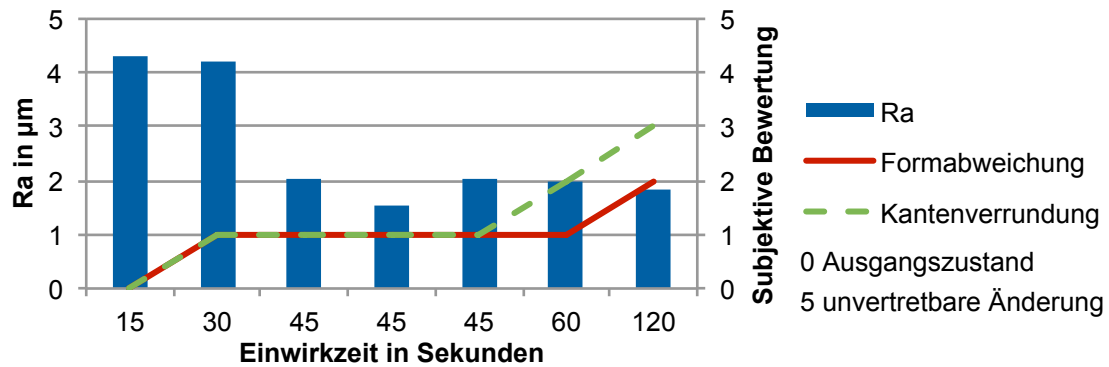


Bild 3-6: Einwirkzeit für Chlorbenzol

Ethylacetat

Die Ergebnisse für Ethylacetat sind in Bild 3-7 dargestellt. Die Kantenverrundung ist über den getesteten Zeitraum relativ konstant und die Formabweichung schwankt nur gering. Die Zunahme von R_a bei 60 Sekunden kann auf einen zu starken Abtrag zurückzuführen sein. Eine Zeit von 45 Sekunden wird für die weiteren Versuche mit Ethylacetat gewählt. Hier sind die Ergebnisse der Messungen relativ konstant und die Formabweichungen nehmen noch nicht stark zu.

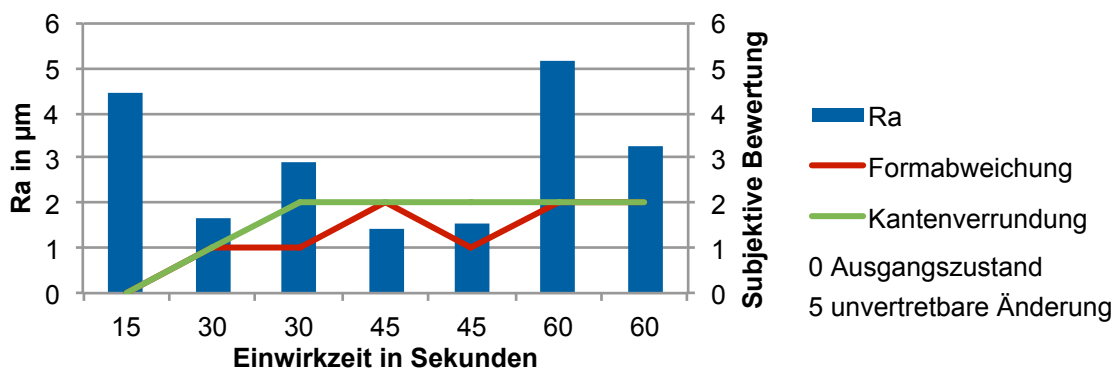


Bild 3-7: Einwirkzeit für Ethylacetat

Ethylmethylketon

Die Ergebnisse für das dritte Keton unter den verwendeten Mitteln sind in Bild 3-8 zu sehen. Erstmals sinkt der R_a Wert unter $1 \mu\text{m}$. Dies geschieht bei 60 Sekunden und unter Abnahme der Formstabilität. Zudem konnte der erreichte Wert in weiteren Versuchen nicht reproduziert werden und kann somit auf eine Prozessunsicherheit zurückzuführen sein. Da die Werte bereits bei 45 Sekunden gut sind sowie die Formstabilität hier relativ hoch und konstant ist, wird diese Zeit für weitere Versuche festgehalten.

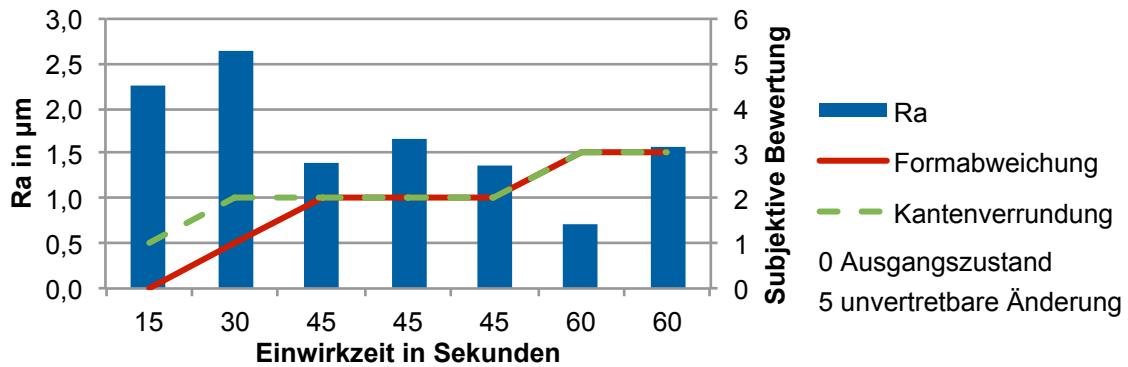


Bild 3-8: Einwirkzeit für Ethylmethylketon

m-Xylol

M-Xylol benötigt eine wesentlich längere Zeit, um auf das verwendete Material einzuwirken. Mit vorherigen Mitteln vergleichbare Rauheitswerte können erst bei einer Einwirkzeit von 30 Minuten erreicht werden. Die Formstabilität ist dabei noch sehr gut und die Ergebnisse sind sehr konstant. Dies liegt an der sehr langen Einwirkzeit. Dadurch ist die Nachbehandlung nur wenig fehleranfällig. Wird etwa die Zeit nicht genau eingehalten oder liegen Unterschiede in der Ein- und Austauschzeit oder der Schwenkbewegung nach der Behandlung vor, wirken sich diese kaum auf das Ergebnis aus. Die Ergebnisse zeigt Bild 3-9.

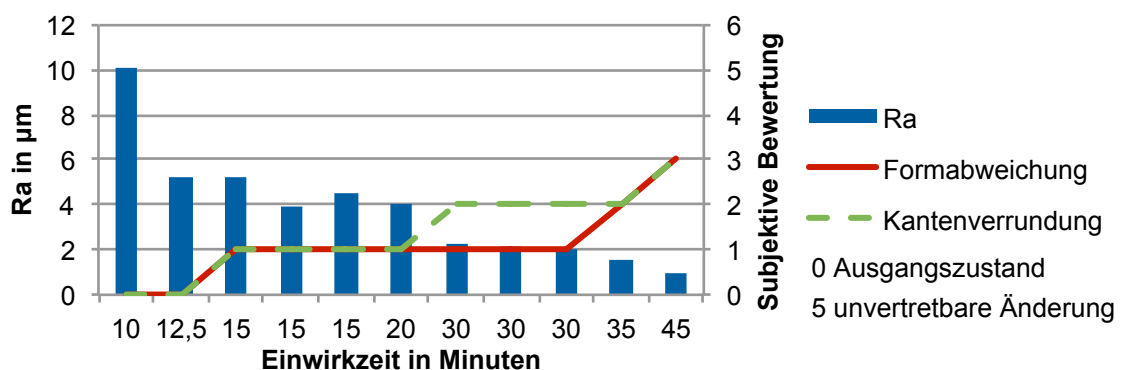


Bild 3-9: Einwirkzeit für m-Xylol

Toluol

Toluol ist neben m-Xylol der zweite aromatische Kohlenwasserstoff. Die Einwirkzeit ist jedoch wesentlich kürzer. Schon bei 300 Sekunden werden mit den anderen Chemikalien vergleichbare Werte erreicht. Da ohne eine wesentliche Verbesserung der Oberfläche die Formveränderung bei Verlängerung der Zeit steigt, wird die Zeit von 5 Minuten für weitere Versuche gewählt. Bild 3-10 zeigt die Ergebnisse.

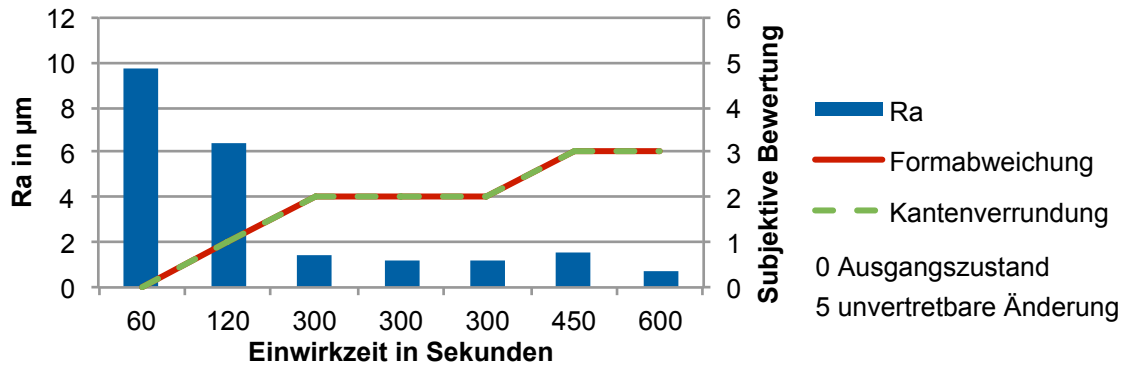


Bild 3-10: Einwirkzeit für Toluol

Bild 3-11 zeigt zusammenfassend die Mittelwerte der einzelnen Chemikalien bei den gewählten, für die weiteren Versuche zu verwendenden Einwirkzeiten. Der Vergleich zeigt, dass insgesamt relativ ähnliche Ergebnisse erzielt werden, was eine gute Ausgangssituation und Vergleichbarkeit für die folgenden Versuche gibt. Zudem kann festgehalten werden, dass eine weitere Verbesserung der Oberflächenstruktur unabhängig vom Behandlungsmedium mit starker und für die meisten Fälle nicht mehr hinnehmbarer Formveränderung einhergeht. Eine niedrigere Aggressivität mancher Medien kann somit durch entsprechend längere Einwirkzeiten kompensiert werden. Ob und welche Auswirkungen eine längere Einwirkzeit auf das Bauteil hat, sollen die weiteren Versuche zeigen.

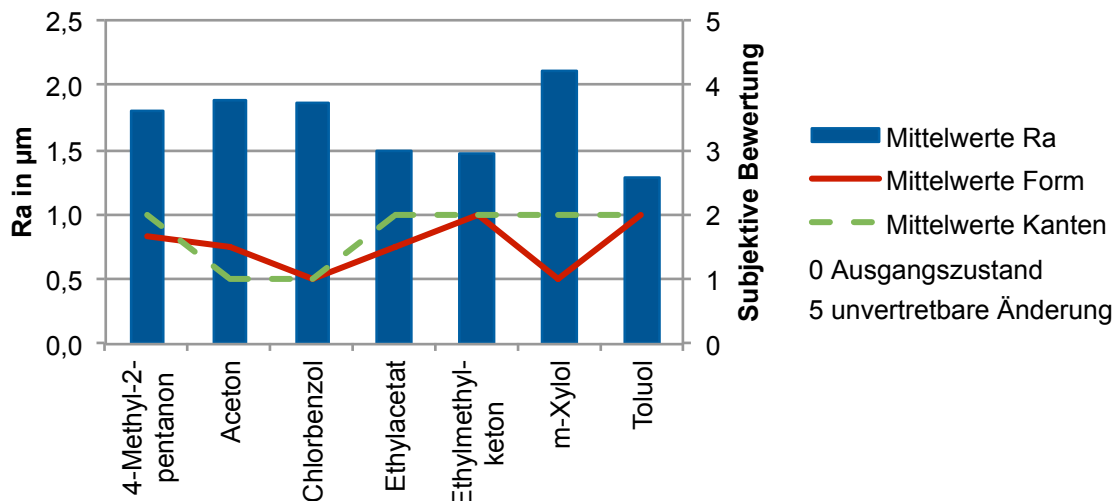


Bild 3-11: Mittelwerte der optimierten Einwirkzeiten

Ein ausführlicher Vorher-Nachher-Vergleich soll an dieser Stelle noch nicht gezogen werden. Durchschnittswerte zeigen aber das grundsätzliche Potential hinsichtlich der Oberflächenbehandlung. Im Mittel weisen die Testkörper eine Ausgangsrauheit Ra von 16,95 µm auf. Mit Aceton, dem preiswertesten verwendeten Mittel mit der geringsten Einwirkzeit ist eine durchschnittliche Verbesserung bei 0,25 Minuten auf

1,89 μm erfolgt. Dies entspricht nur noch ca. 11 % des Ausgangswertes. Bei m-Xylol, dem Mittel mit der längsten notwendigen Einwirkzeit, beträgt der Mittelwert des behandelten Bauteils 2,12 μm , also 12,5 %. Die stärkste Glättungswirkung ergibt sich aus der Behandlung mit Toluol. Hier entspricht der erreichte Wert von durchschnittlich 1,28 μm nur noch 7,6 % des gemittelten Ausgangswertes. Ein optischer Eindruck soll mit Bild 3-12 gegeben werden.

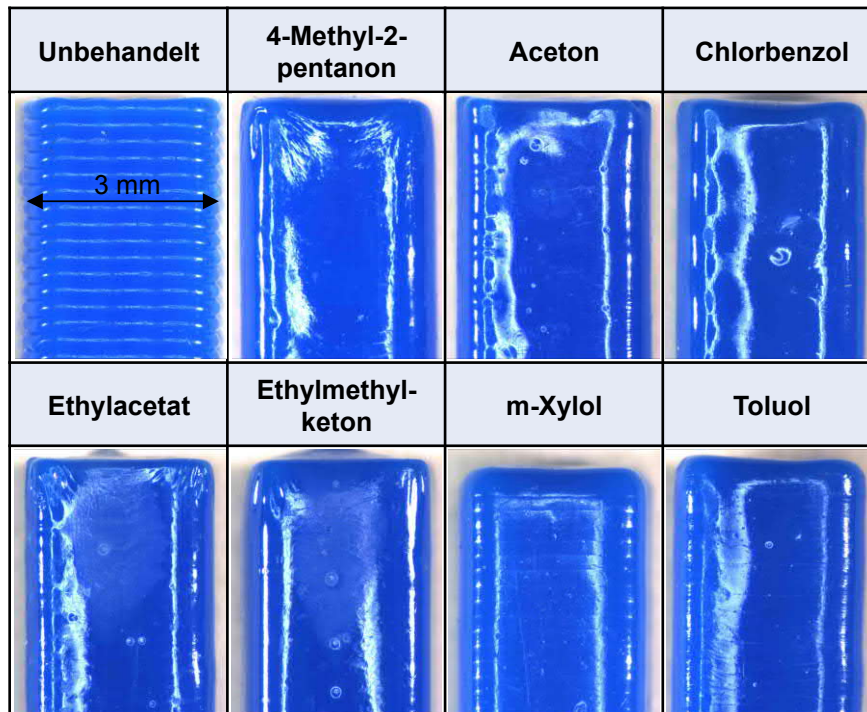


Bild 3-12: Auswirkung geeigneter Chemikalien bei optimierter Einwirkzeit

In der Darstellung sind exemplarisch Testkörper der gewählten Einwirkzeiten zu sehen. Es fällt auf, dass sich teilweise kleine Luftblasen bilden. Hier soll nochmals auf die geringe Größe der Testkörper von nur 3 mm Breite verwiesen werden. Die Einschlüsse sind demnach sehr klein und nur in der Detailansicht zu sehen. Sie kommen insgesamt vermehrt bei den Medien vor, die eine Einwirkzeit von unter einer Minute haben. Bei 4-Methyl-2-pentanon sowie Toluol mit jeweils 5 Minuten Wirkzeit sind nur sehr wenige Einschlüsse festzustellen, während bei m-Xylol mit 30 Minuten Wirkzeit fast keine Luftblasen zu erkennen sind. Eine Erklärung ist darin zu sehen, dass bei der sehr schnellen Reaktion die in der porösen Struktur des FLM-Bauteils befindliche Luft nicht schnell genug entweichen kann, während sich die Oberflächenstruktur schließt. Es bildet sich zu schnell eine dichte Schicht, die sowohl ein weiteres Eindringen des Mediums als auch den Austritt der Luft verhindert. Demnach sollten die Eindringtiefe und somit auch die Gewichtszunahme bei Chemikalien mit langer Einwirkzeit größer sein. Dies ist später anhand detaillierter Betrachtungen zu belegen. Vorweg kann jedoch das Wiegen der Probekörper für die Einwirkzeit den Zu-

sammenhang bestätigen. Die mit Aceton behandelten Bauteile sind um 0,96 % schwerer als die unbehandelten Bauteile. Toluol, mit einer Einwirkzeit von 5 Minuten erwirkt bereits eine Gewichtszunahme von 2,83 %. Wie zu erwarten, ist die Zunahme bei m-Xylol mit 5,81 % am höchsten.

Auch wenn die Versuche nicht dazu dienen einen Löslichkeitsparameter für das verwendete Material zu ermitteln, soll kurz Bezug auf die Literaturwerte der Chemikalien genommen werden. Tabelle 3-5 zeigt die Mittel sortiert nach ihren Einwirkzeiten und die dazugehörigen Löslichkeitsparameter.

Tabelle 3-5: Vergleich der Löslichkeitsparameter

	Einwirkzeit [min]	Löslichkeitsparameter
Aceton	0,25	20,5
Chlorbenzol	0,75	19,4
Ethylmethylketon	0,75	19
Ethylacetat	0,75	18,6
Toluol	5	18,2
4-Methyl-2-pentanon	5	17,2
m-Xylol	30	18

Grundsätzlich ist ein direkter Zusammenhang zwischen der ermittelten Einwirkzeit und den literaturbasierten Löslichkeitsparametern [58] gegeben. Mit steigendem Parameter sinkt die notwendige Einwirkzeit. Lediglich 4-Methyl-2-pentanon zeigt eine schnellere Reaktion, als der Löslichkeitsparameter vermuten ließe. Wie beschrieben, ist der Parameter jedoch von vielen Faktoren überlagert, die hier nicht berücksichtigt sind. Daher reicht die Genauigkeit nur für eine sehr grobe Abschätzung aus. Zudem ist der direkte und vor allem proportionale Zusammenhang zwischen Oberflächen-glättung und Löslichkeit nicht eindeutig. Für das verwendete ABS kann festgehalten werden, dass der Löslichkeitsparameter mindestens bei dem von Aceton, vielleicht auch höher liegt, da die Löslichkeit mit zunehmendem Wert steigt.

3.4.2 Rauheit

Mit den nun definierten Einwirkzeiten können im Folgenden detaillierte Betrachtungen durchgeführt werden. Zu Beginn erfolgt die Bestimmung des wichtigsten Kennwertes bei der Nachbearbeitung, der Oberflächenrauheit. Dazu dient der in Bild 3-13 dargestellte Probekörper mit drei zur Verfügung stehenden Messflächen. Er wurde in abgebildeter Orientierung gebaut, sodass die mit 30° bemaßte Fläche im Bezug auf den eingeführten Begriff der Bauteilorientierung einem Winkel von 60° entspricht. Bei

dieser Orientierung tritt der Treppenstufeneffekt deutlich in Erscheinung, wodurch auch dessen Reduzierung bei der Auswertung betrachtet werden kann. Zudem soll die optisch am meisten ansprechende Fläche von 0° berücksichtigt werden. Hier tritt bei unbehandelten Bauteilen die niedrigste Rauheit auf [10]. Außerdem wird die Bauteilunterseite mit in die Auswertung einbezogen. Durch die verfahrensbedingten Zwischenräume ist auch hier von einer relativ hohen Rauheit auszugehen. Der kleine, an das Bauteil modellierte Würfel dient lediglich dem Handling. So kann ein unerwünschter Einfluss während der Handhabung auf die zu messenden Flächen verhindert werden.

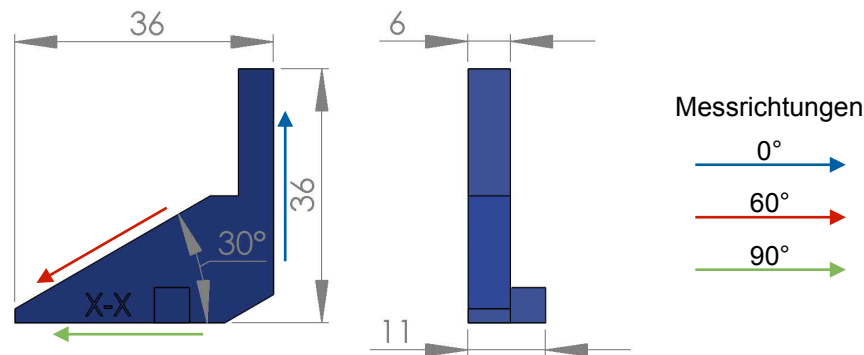


Bild 3-13: Probekörper und Messrichtungen für die Rauheitsmessungen

Alle Flächen werden vor und nach der Behandlung dreifach vermessen. Die Messbedingungen entsprechen denen der Untersuchung zur Einwirkzeit und demnach den anzuwendenden Normen. Die Auswertung erfolgt durch die Bildung des Mittelwertes sowie der Ermittlung der Standardabweichung. Zunächst soll der Ausgangszustand für eine bessere Interpretation der Nachbehandlung aufgezeigt werden. Tabelle 3-6 zeigt dazu die Mittelwerte sowie Standardabweichungen aller verwendeten Bauteile.

Tabelle 3-6: Durchschnittliche Rauheit der unbehandelten Probekörper

Unbehandelte Testkörper	0°		60°		90°	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
Mittelwert [μm]	17,17	77,10	41,73	190,47	20,78	108,88
Standardabweichung [μm]	0,88	5,34	1,27	7,45	2,60	14,09
Standardabweichung [%]	5,10%	6,93%	3,03%	3,91%	12,50%	12,94%

Wie zu erwarten, sind die senkrecht zur Bauplattform ausgerichteten Flächen wesentlich glatter, als die mit 60° geneigten Flächen. Die parallel zur Bauplattform liegenden Flächen weisen ebenfalls hohe Rauheitswerte auf. Dies liegt an der drahtähnlichen Struktur, die auch im fertigen Bauteil deutlich auf der Ober- und Unterseite zu sehen ist. Die Standardabweichungen bei 0° und 60° sind mit prozentualen Werten zwischen 3 und 7 % relativ gering. Lediglich bei der 90° Orientierung treten Abwei-

chungen von ca. 13 % auf. Dies ist auf den Umstand der Messung zurückzuführen. DIN-konform müsste senkrecht zur Rillenrichtung gemessen werden [159]. Durch die in 45° versetzten Werkzeugbahnen in der x-y-Ebene ist dies bei den Testkörpern nicht möglich, wodurch es zu solchen Abweichungen kommen kann. Zudem sind die entstehenden Rillen in Randbereichen meist höher, sodass die drei Messungen an einem Bauteil stark von der Wahl der Messstelle abhängen.

Die gemittelten Ergebnisse der Messungen des arithmetischen Mittenrauwerkes R_a sind für alle Einwirkmedien in Bild 3-14 dargestellt. Zunächst ist festzuhalten, dass die orientierungsabhängige Rauheit auch nach der Nachbehandlung existent ist. Senkrecht zur Bauplattform ausgerichtete Flächen haben die niedrigsten Kennwerte, während die Unterseite und die 60° orientierten Oberflächen vergleichbare Werte annehmen. Die verhältnismäßig niedrige Rauheit bei 0° ist aufgrund der Ausgangswerte zu erwarten. Die Annäherung der anderen Orientierungen ist jedoch aufgrund der Ausgangssituation zunächst nicht klar. Eine Erklärung liegt in der Struktur der Materialbahnen. Während bei 60° orientierten Flächen vorrangig die äußersten Bahnen durch die Nachbehandlung beeinflusst werden und das fließfähige Material entlang der Außenkontur eine glättende Schicht bildet, kann das Material an der Ober- und Unterseite durch die prozessbedingten größeren Lücken auch nach innen einsinken, wodurch die Glättung verringert wird.

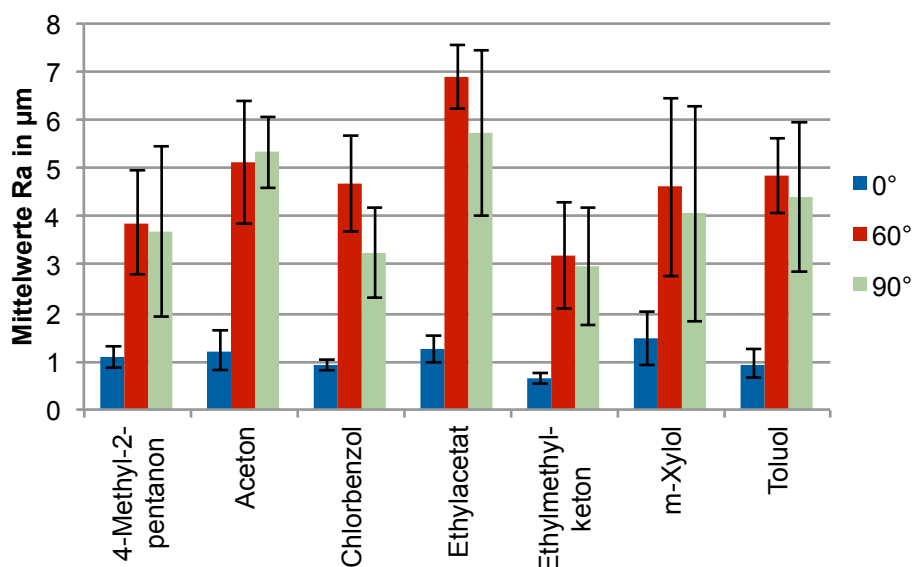


Bild 3-14: Mittelwerte der arithmetischen Mittenrauwerkte R_a

Die Standardabweichung ist bei 0° orientierten Flächen wesentlich geringer, als bei den anderen Orientierungen. Prozentual, bezogen auf den erreichten Rauheitswert, relativiert sich der Unterschied, ist jedoch trotzdem vorhanden. Erklärbar ist dies durch die Differenz der Rauheit im Ausgangs- und Endzustand. Während Aceton

beispielsweise von dem Mittelwert bei 0° durchschnittlich um ca. 16 µm glättet, ist der Unterschied bei 60° ca. 36,5 µm. Da die hier verwendete Methode nicht derart unabhängig vom Ausgangswert ist, wie beispielsweise das Glätten einer Oberfläche durch fräsende Bearbeitung, kann es zu solchen Abweichungen kommen. Die Abweichungen der parallel zur Bauplattform orientierten Flächen sind ohnehin auf die Abweichungen des Ausgangszustandes zurückzuführen. Insgesamt fällt auf, dass die niedrigsten Werte durch die Nachbehandlung mit Ethylmethyleketon zu erreichen sind. 0° Flächen erreichen im Durchschnitt einen Ra Wert von 0,65 µm, 60° und 90° Flächen liegen bei ca. 3 µm. Die schlechtesten Werte erreicht Ethylacetat. Hier liegen die Werte zwischen 1,24 (0°) und 6,9 µm (60°). Trotz der Schwankungen, sowohl hinsichtlich der Standardabweichung als auch zwischen den Wirkmedien, können die Ergebnisse als gut vergleichbar gewertet werden. Durch die chemische Natur der Wirkweise und die weiteren Einflüsse auf den Prozess können die Ergebnisse kaum eine Konstanz aufweisen wie beispielsweise beim Fräsen durch klare Vorgabe von Werkzeug- und Prozessbedingungen.

Um auch die Peaks der Oberflächen zu berücksichtigen, wird in Bild 3-15 die gemittelte Rautiefe Rz herangezogen. Es fällt sofort auf, dass der Graph mit Ausnahme der Skalierung der Ordinatenachse nahezu identisch mit dem für Ra ist. Auch die Standardabweichungen sind prozentual gesehen vergleichbar. Demnach kann der Schluss gezogen werden, dass auch bei Peaks in einer Oberfläche eine gute Minderung durch die chemische Nachbearbeitung erfolgt. Wieder weist Ethylmethyleketon die niedrigsten Werte auf. Bei 0° entspricht dies einem Rz von 2,73 µm, bei 60° 13,83 µm und bei 90° 11,71 µm. Erneut mit den insgesamt schlechtesten Werten stellt sich Ethylacetat heraus. Hier liegt Rz zwischen 5,23 und 33,86 µm.

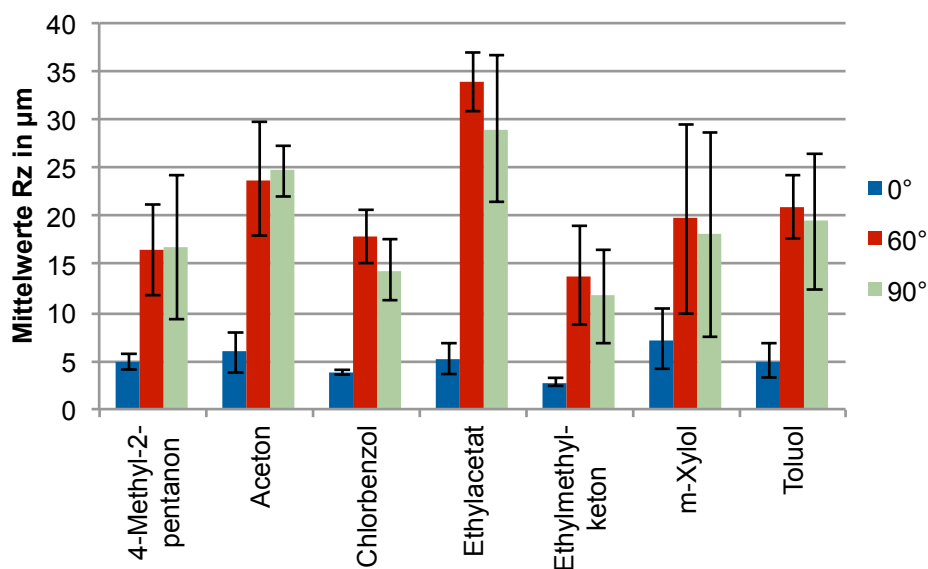


Bild 3-15: Mittelwerte der gemittelten Rautiefe Rz

In einer nächsten Betrachtung der Ergebnisse sollen Schwankungen der Ausgangsrauheit aus der Bewertung eliminiert werden. Dazu dient Gleichung 3.3 mit deren Hilfe die Ermittlung eines Verbesserungsfaktors erfolgt. Dieser bezieht sich jeweils auf den auf drei Messungen beruhenden Wert der Rauheit einer jeden Fläche der einzelnen Bauteile und nicht auf die in Tabelle 3-6 dargestellten Gesamtmittelwerte. Somit erfolgt ein direkter Vorher-Nachher-Vergleich der einzelnen Bauteile und Orientierungen, der die jeweilige Ausgangssituation berücksichtigt.

$$\text{Verbesserungsfaktor} = \frac{R_{* \text{ unbehandelt}} [\mu\text{m}]}{R_{* \text{ behandelt}} [\mu\text{m}]} \quad (3.3)$$

Die Resultate und Schlussfolgerungen ändern sich auch bei dieser Betrachtung nicht. Bild 3-16 zeigt die Verbesserungsfaktoren aller Chemikalien und Orientierungen jeweils für Ra und Rz. Zudem ist der Mittelwert der Verbesserung einer Chemikalie für die drei Orientierungen dargestellt.

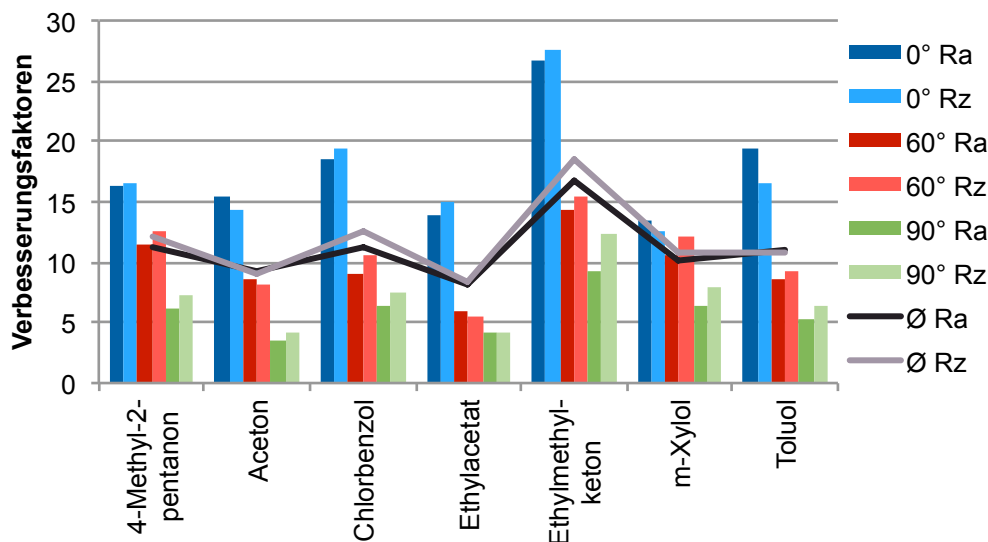


Bild 3-16: Verbesserungsfaktoren der unterschiedlichen Orientierungen

Es ist zu sehen, dass auch im Vorher-Nachher-Vergleich Ethylmethylketon die besten Ergebnisse in jeder Orientierung liefert. Der Verbesserungsfaktor beträgt für Ra bei 0° ca. 26,6, bei 60° 14,2 und bei 90° 9,3, für Rz liegt er zwischen 12,4 bei 90° und 27,7 bei 0°. Die übrigen Chemikalien weisen bei ihren absoluten Mittelwerten alle relativ ähnliche Werte zwischen 8,1 und 11,3 für Ra sowie 9 und 12,6 für Rz auf. Toluol und Chlorbenzol zeigen sehr ähnliche Faktoren. M-Xylol ist durchschnittlich ebenfalls vergleichbar, jedoch im Hinblick auf die in Bild 3-14 und Bild 3-15 sehr deutlich erkennbare hohe Standardabweichung qualitativ nicht mit den beiden anderen Chemikalien zu vergleichen. Eine mögliche Erklärung für die hohe Standardabweichung ist die lange Einwirkzeit. So können unterschiedliche Orientierungen beim

Eintauchen oder mögliche Bewegungen währenddessen für Schwankungen sorgen. Aceton zeigt sich auch unter Einbezug der Rohzustände nach wie vor als gute Lösung für die Nachbehandlung. In erster Linie ist diese Chemikalie sehr preiswert und auch für Privatanwender leicht zugänglich und unter relativ geringen Risikofaktoren zu handhaben.

Zur Veranschaulichung sind die 60° Flächen der unterschiedlichen Nachbehandlungen in Bild 3-17 abgebildet. Auch hier sind die Luftpfeinschlüsse unter der Oberfläche zu erkennen. Die Häufigkeit sinkt, wie bereits bei den Probekörpern zur Einwirkzeit, mit zunehmender Behandlungsdauer. Die farblichen Unterschiede resultieren zum einen aus den verwendeten Chemikalien, entstehen jedoch auch durch die Reflexion an der Bauteiloberfläche. Trotz einer gleichen Positionierung und gleichen Belichtungsbedingungen ist der Einfluss durch kleinste Schwankungen auf der Abbildung oftmals schon deutlich zu sehen. Die Farbtreue wird in weiteren Untersuchungen gesondert betrachtet. Insgesamt ist gut zu sehen, dass der am unbehandelten Bauteil sehr deutlich zu erkennende Treppenstufeneffekt bei den nachbehandelten Bauteilen kaum festzustellen ist. Die Oberfläche wirkt sehr homogen. Hier sei nochmals auf die auch hier sehr geringen Maße hingewiesen. Die Bauteilbreite des abgebildeten Teils beträgt lediglich 6 mm.

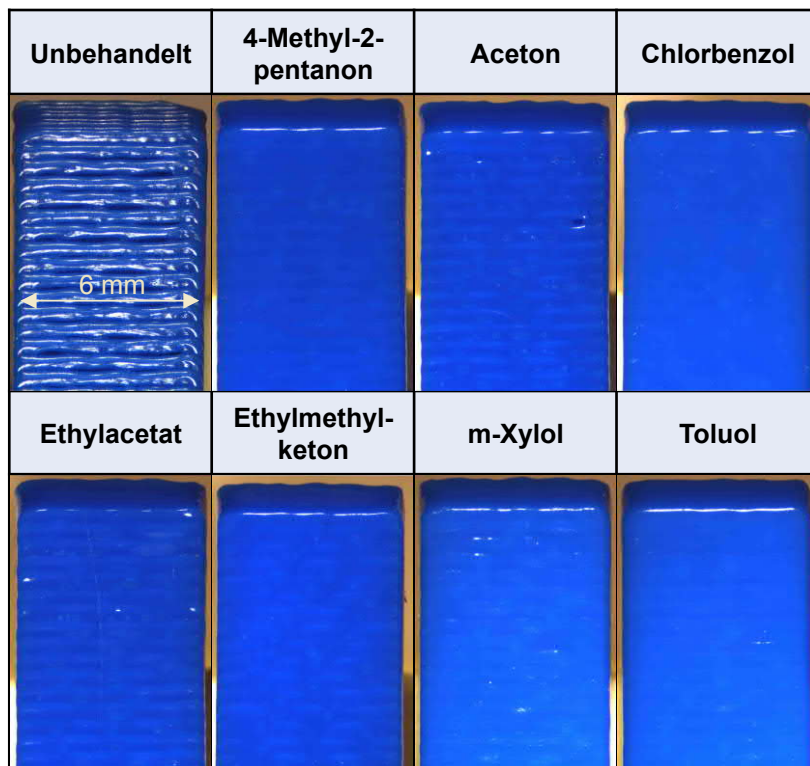


Bild 3-17: Detailansicht der 60° Flächen

Zusammenfassend muss darauf hingewiesen werden, dass trotz der insgesamt sehr hohen Glättung der einzelnen Oberflächen keine homogene Rauheit zu erreichen ist. Die ohnehin schon guten 0° Flächen erfahren durch die gute Möglichkeit der Homogenisierung eine starke Glättung, während die Bauteilunterseite, wie bereits beschrieben, durch das Absinken in untere Lücken weniger stark geglättet wird. Der Verbesserungsfaktor der 60° Flächen liegt zwischen denen der anderen Flächen. Zumindest für die durch den Treppenstufeneffekt geprägte Fläche und die Bauteilunterseite ergibt sich somit eine Annäherung der Rauheit. Während R_a der unbehandelten 60° Flächen noch ca. um den Faktor 2 höher ist als bei 90° Flächen, liegt dieser Faktor bei nachbehandelten Bauteilen nur noch bei maximal 1,2. Trotzdem ist auch unter Berücksichtigung der chemischen Nachbehandlung auf die im Grundlagenteil erwähnten Möglichkeiten der optimalen Bauteilausrichtung zu achten.

Um den Versuchsumfang für die noch folgenden Betrachtungen einzugrenzen, soll an dieser Stelle die Auswahl von drei Chemikalien erfolgen. Mit Aceton ist eines der gängigsten und preiswertesten Lösemitteln vorhanden, was gerade für die Anwendung im Privatbereich, in dem der Einsatz von preiswerten FLM-Anlagen immer weiter steigt, von großem Interesse ist [2] [8]. Toluol wird in die Betrachtungen einbezogen, um ein Mittel mit einer relativ langen Einwirkzeit zu betrachten. Verglichen mit 4-Methyl-2-pentanone, welches ebenfalls eine Wirkzeit von 5 Minuten erfordert, weisen die Oberflächen bei Toluol insgesamt eine geringfügig bessere Oberfläche auf. Als Medium mit den besten Resultaten hinsichtlich der Oberflächenrauheit wird als dritte Chemikalie Ethylmethylether in die weiteren Betrachtungen einbezogen.

3.4.3 Farbwiedergabe

Neben der nun bewerteten Oberflächenrauheit, die unter Umständen neben optischen auch wesentliche funktionelle Eigenschaften inne hat, erfolgt in diesem Kapitel die rein optische Betrachtung der Bauteile. Gerade im Bereich von Anschauungsmodellen ist diese von großer Bedeutung. Für die neun zur Verfügung stehenden Farben soll dabei keine explizite Bestimmung der Einwirkzeit erfolgen. Alle Bauteile werden mit den für die Farbe Blau ermittelten Zeiten nachbehandelt. Als Probekörper kommen einfache Würfel in den neun Farben zum Einsatz. Für jeden Zustand, also unbehandelt und für jede Chemikalie, werden drei Bauteile hergestellt, um die Versuche statistisch abzusichern. Die Bewertung erfolgt zunächst entsprechend DIN EN 12018 durch direkte Sichtprüfung. Dabei ist vor allem auf immer gleich bleibende Betrachtungsbedingungen zu achten. Dazu gehören unter anderem: [160]

- Korrekte Ausrichtung und Abstand zwischen Bauteilen und Betrachter
- Vermeidung von Blendung
- Konstante Farbtemperatur der Beleuchtung

Die notwendigen Bedingungen liegen in einem abgedunkelten Raum mit neutraler Fotobeleuchtung vor. Um die Farbunterschiede nicht nur auf subjektiver, sondern auch auf quantitativer Ebene beurteilen zu können, müssen die Bauteile bzw. die vorhandenen Farben digitalisiert werden. Aufnahmen mit einer Digitalkamera unter Zuhilfenahme von Beleuchtung und der Abmessung der Abstände zwischen Kamera, Bauteil und Beleuchtung führen zu sehr unterschiedlichen Farbeindrücken. Dies resultiert unter anderem aus den kamerainternen Algorithmen zur Bildbearbeitung und Belichtung, die jedes einzelne Bild beeinflussen. Besser vergleichbare Bilder entstehen durch das Einscannen der Bauteile mit einer Auflösung von 600 dpi auf einem Scanner. Ausschnitte von jeweils einem der drei Bauteile pro Zustand sind in Bild 3-18 dargestellt. Es fällt direkt auf, dass die Farben nicht zwingend dem optischen Erscheinungsbild entsprechen. Gerade bei den Farben Gelb und Elfenbein ist dieser Unterschied deutlich. Die Differenzen der unterschiedlichen Zustände werden jedoch sehr gut wiedergespiegelt. Die gleichzeitige Aufnahme bei identischer Belichtung und interner Bildverarbeitung schafft somit gute Voraussetzungen für einen quantitativen Vergleich.

Material- farbe	Unbe- handelt	Aceton	Ethylme- thylketon	Toluol
Gelb				
Orange				
Elfenbein				
Weiß				
Rot				
Grün				
Blau				
Grau				
Schwarz				

3,25 mm

Bild 3-18: Übersicht der Versuche zur Farbbeständigkeit

Die Darstellung zeigt sehr deutlich, dass die Farben sehr gut erhalten bleiben, jedoch ein Unterschied durch die Schatten der einzelnen Schichten entsteht, der den Gesamteindruck verändert. Deutlich homogener wirken somit die nachbehandelten Bau-

teile. Zur Quantifizierung der Unterschiede wird der euklidische Abstand in einem Farbraum zwischen den unbehandelten und den nachbehandelten Proben ermittelt. Gemäß DIN EN ISO 11664-4 ist jeder Farbe ein Wert im CIELAB-Farbenraum zugeordnet. Die Achsen dieses Raumes sind wie folgt definiert [161] [162]:

- L^* = CIELAB Helligkeit
- a^* = Rot-Grün-Buntheit
- b^* = Gelb-Blau-Buntheit

Diese Werte können auf Basis der eingescannten Bauteile direkt durch die Software Photoshop der Firma Adobe ermittelt werden. Basis dafür ist ein Bildausschnitt von 5 x 5 Pixeln für unbehandelte und 11 x 11 Pixeln für nachbehandelte Bauteile. Der kleinere Bereich bei unbehandelten Bauteilen resultiert aus den einzelnen Schichten und den damit in Verbindung stehenden Tälern im Bauteil. In diese wird der beschriebene Schatten geworfen. Um diesen und somit eine Verfälschung der Ergebnisse zu verhindern, ist der gemessene Bereich so klein gewählt, dass nur eine Schicht bzw. nur der Hochpunkt der Schicht genutzt wird. Generell ist bei der Auswahl der Messstellen zu berücksichtigen, dass ein möglichst homogener und repräsentativer Teil des Bauteils zu wählen ist. Anhand Gleichung 3.4 kann mithilfe der ausgelesenen Werte der euklidische Abstand zwischen zwei Farbreizen ermittelt werden. [162]

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3.4)$$

Für eine bessere Übersicht sind die Ergebnisse auf zwei Abbildungen aufgeteilt. Der angegebene Wert stellt die mittlere Differenz der drei nachbehandelten Bauteile zum durchschnittlichen Wert der unbehandelten Referenzen dar. Bild 3-19 zeigt zunächst die Farben mit einer Helligkeit über 50 nach CIELAB, also die im Vergleich helleren Farben.

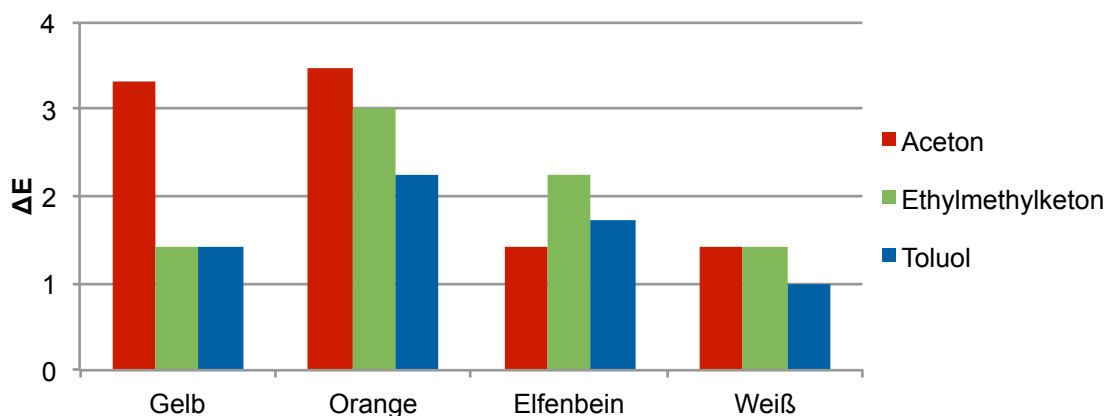


Bild 3-19: Darstellung der Farbunterschiede, Teil 1

Ein direkter Zusammenhang zwischen Farbveränderung und Wirkmedium ist anhand dieser Farben nicht festzustellen. Lediglich Aceton ist bei einer der vier Farben die Chemikalie, die deutlich stärkere Farbänderungen hervorruft. Bei den Farben Elfenbein und Weiß sind die Unterschiede auf relativ gleichem Niveau. Bei Betrachtung der Mittelwerte über die vier Farben, kann Toluol als am geringsten verändernd eingestuft werden. Hier ist der Mittelwert für ΔE 1,6 während er bei Ethylmethylketon bei 2,0 und bei Aceton bei 2,4 liegt. Mit steigender Aggressivität der Chemikalie gegenüber dem ABS sinkt also auch die Farbbeständigkeit, obwohl die Einwirkzeiten entsprechend angepasst sind. Die Ergebnisse der übrigen Farben, also denen mit einer CIELAB-Helligkeit unter 50, sind in Bild 3-20 zu sehen.

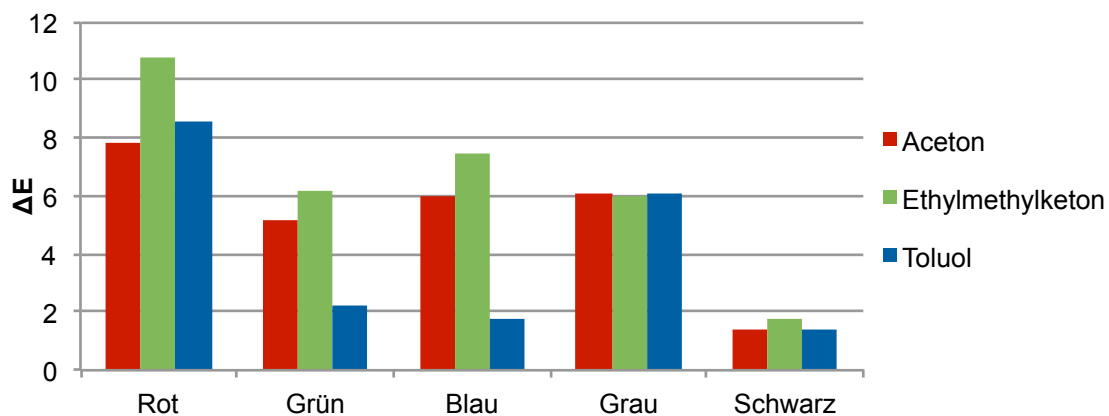


Bild 3-20: Darstellung der Farbunterschiede, Teil 2

Mit Ausnahme der Farbe Schwarz ist zu sehen, dass die Auswirkungen auf intensivere bzw. dunklere Farben deutlicher sind, als die auf hellere Farben. Rot zeigt sich dabei besonders beeinflusst durch die chemische Nachbehandlung. Schwarz hingegen wird in seiner äußeren Erscheinung nur sehr gering beeinträchtigt. Eine erneute Betrachtung der Mittelwerte zeigt, dass wieder Toluol den geringsten Einfluss ausübt. Der Durchschnitt liegt bei 4,1. Aceton und Ethylmethylketon sind mit 5,31 bzw. 6,43 relativ ähnlich aber deutlich höher als Toluol.

Insgesamt zeigt sich, dass die Farbe mit dem höchsten Rotanteil, also dem höchsten Wert der Rot-Grün-Buntheit sowohl bei den helleren als auch bei den dunkleren Farbtönen am stärksten von der Ausgangsfarbe abweicht. Rot und Orange wirken bei der Sichtprüfung blasser und bestätigen die gemessenen Werte. Generell kann die Sichtprüfung die Farbraumauswertung in Gänze bekräftigen. Wird nun der gesamte Mittelwert der Abweichung betrachtet, zeigt sich deutlich, dass Toluol über die gesamte Farbpalette die geringsten Farbunterschiede hervorruft. Der Wert beträgt 2,9. Aceton und Ethylmethylketon ähneln sich mit den Werten 4,0 und 4,5. Die Unterschiede sind auf die Stärke der Wirkung auf den Kunststoff bzw. auf die Farbstoffe

zurückzuführen. Da die Zusammensetzung nicht bekannt ist, können die Gründe für die unterschiedlichen Ausprägungen nicht bestimmt werden. Es lässt sich aber festhalten, dass die Farbveränderung bei Sichtprüfung relativ gering erscheint und sich vor allem ein homogenes Bild einstellt. Um die ermittelten Werte besser in Verbindung mit den Sichtproben zu bringen, kann eine Einstufung der Veränderung entsprechend Tabelle 3-7 erfolgen. Diese stammt aus der Druck- bzw. Fototechnik. Dort wird sie insbesondere für die Bildschirmwiedergabe beim Softproofing, also der farbmtrischen und inhaltlichen Überprüfung vor dem Druck verwendet und stellt somit extrem hohe Anforderungen an die Farbwiedergabe. [161]

Tabelle 3-7: Bewertung der Farbdifferenz [161]

ΔE	Empfindung
0 – 1	normalerweise nicht sichtbar
1 – 2	sehr kleine Abweichung, nur von geschultem Auge erkennbar
2 – 3,5	mittlere Abweichung, auch von ungeschultem Auge erkennbar
3,5 – 5	deutliche Abweichung
> 6	starke Abweichung

Demnach sind die Auswirkungen aller Chemikalien auf die Farben Weiß und Schwarz mit Werten zwischen 1 und 2 am geringsten und somit laut Einstufung nur von geschultem Auge erkennbar. Auch Elfenbein und Gelb befinden sich mit Ausnahme von Ethylmethylketon (2,2) bei Elfenbein sowie Aceton (3,3) bei Gelb in diesem Bereich. Orange zeigt relativ konstante Farbveränderungen mit Werten von 2,2 bis 3,5 und ist somit im Bereich der mittleren Abweichung. Sehr differente Farbeinflüsse herrschen bei Blau und Grün vor. Toluol bewegt sich dort im Bereich kleiner Abweichungen während Aceton und Ethylmethylketon vorwiegend starke Abweichungen hervorrufen. Durchweg starke Auswirkungen kommen bei Rot und Grau vor. Grau liegt mit konstanten Werten von 6 für alle Mittel auf der Grenze zur starken Abweichung. Rot übersteigt diese Grenze teils deutlich mit Werten bis zu 10,8 für Ethylmethylketon. Inwiefern die Skala der Foto- und Drucktechnik auf die Brauchbarkeit von Bauteilen übertragen werden kann, liegt definitiv im Auge des Betrachters. Eine Abweichung vom ursprünglichen Herstellerfarbton ist kein Ausschlusskriterium, solange ein insgesamt homogenes und ansprechendes Erscheinungsbild erzielt werden kann. Neben den messbaren Farbunterschieden haben die nachbehandelten Bauteile zudem eine glänzende Oberfläche und wirken so sehr hochwertig. Gerade schwarze, grüne und blaue Bauteile zeigen einen sehr satten, kräftigen Farbton. Da generell ein hochwertiger und homogener Eindruck entsteht, kann keine Empfehlung zu einer Chemikalie bezüglich der Farbgebung ausgesprochen werden. Die geringsten Änderungen gegenüber dem Ausgangszustand erwirkt Toluol. Sollten beispiels-

weise nach- und unbehandelte Bauteile in einer Baugruppe kombiniert werden, ist dieses Mittel vorzuziehen. Ansonsten sind die Ergebnisse vergleichbar.

Ein Aspekt, der die nachbehandelten Bauteile hinsichtlich des äußeren Erscheinungsbildes negativ beeinflusst, sind weißliche Ablagerungen nach der Trocknung. Diese traten jedoch nur bei einigen Bauteilen auf. In vorhandenen Veröffentlichungen wurden diese Verfärbungen entweder gar nicht erwähnt oder es wurde lediglich auf deren Existenz hingewiesen. Der Verdacht fällt dabei auf kontaminierte Lösemittel oder Umwelteinflüsse [18]. Bild 3-21 zeigt exemplarisch ein Bauteile mit den beschriebenen Ablagerungen.



Bild 3-21: Ablagerungen an Bauteilen

Da die Verfärbung nur bei Bauteilen auftritt, die vorher zur Supportentfernung in der Auswaschstation behandelt wurden, ist die verwendete Flüssigkeit damit in Verbindung zu bringen. Zudem treten die Ablagerungen besonders dann zum Vorschein, wenn größere Bauteile mit der Einstellung Sparse gebaut werden. Diese führt dazu, dass sich die Auswaschflüssigkeit im Bauteil sammeln kann und nicht sofort komplett abfließt. Dies wird deutlich, wenn solche Bauteile beispielsweise auf ein Tuch zum Trocknen gestellt werden. Auch bei regelmäßigem Wechsel ist noch nach Tagen Feuchtigkeit am Tuch festzustellen. Bei der Behandlung mit Aceton kommen die Ablagerungen am stärksten zum Vorschein. Auch bei Ethylmethylketon sind sie noch recht stark ausgeprägt. Nur Toluol führt nicht zu diesem Phänomen. Um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen Supportentfernung und weißer Ablagerung besteht, ist zunächst zu klären, was für eine Flüssigkeit dafür verwendet wird. Es handelt sich um ein in Wasser zu lösendes Pulver. Hauptbestandteil ist laut Etikettierung Natriumhydroxid, welches in Verbindung mit Wasser eine stark alkalische, ätzende Lösung mit dem Namen Natronlauge bildet [163]. Um nun zu überprüfen, ob die Ablagerungen in einem direkten Zusammenhang mit der Supportentfernung stehen, erfolgt zunächst die Bestimmung des pH-Wertes einer kleinen Menge frisch angesetzter Auswaschflüssigkeit mit Hilfe eines Messstreifens. Der Wert beträgt 12 und ist somit stark basisch. In einem nächsten Schritt werden die beschriebenen Ablagerungen des Bauteils vorsichtig abgekratzt und gewogen. Im vorgegebenen Mischverhältnis des Ausgangsmaterials der Auswaschstation erfolgt die Mischung der Ablagerung mit Wasser, welches mit einem pH-Wert von 7 als neutral einzustufen ist. Die Messung der entstandenen Lösung ergibt einen pH-Wert von 10. Dieser ist nicht so

stark alkalisch wie die ursprüngliche Auswaschlösung, lässt jedoch eindeutig darauf schließen, dass die Ablagerungen zu einem großen Teil Natriumhydroxid sind. Es bleibt offen, aus welchem Grund die Ablagerungen erst durch die Nachbearbeitung auftreten und warum dies nicht bei allen Chemikalien geschieht.

Dazu ist zunächst festzuhalten, dass es sich bei Aceton und Ethylmethylketon um Ketone handelt, die sowohl mit Wasser als auch mit der Natronlauge gut mischbar sind. [164] Toluol, ein aromatischer Kohlenwasserstoff hingegen ist nicht mit der Lauge mischbar, wodurch ein Zweiphasengemisch entsteht [165]. Zudem ist die Verdunstungszahl nach DIN 53170 der einzelnen Medien zu betrachten. Diese ist definiert als das Verhältnis der Verdunstungszeit der Flüssigkeit zur Verdunstungszeit für Diethylether. Bei hohen Verdunstungszahlen herrscht also eine im Vergleich zu Diethylether langsame Verdunstung vor. [166] Tabelle 3-8 zeigt die Werte der relevanten Fluide [167] [168].

Tabelle 3-8: Verdunstungszahlen relevanter Medien

Medium	Verdunstungszahl
Wasser	80
Aceton	2,1
Ethylmethylketon	2,7
Toluol	6,1

Im Falle der Ketone ist die Verdunstungszahl am geringsten. Während Wasser 80 mal langsamer verdunstet als Diethylether, ist der Faktor bei Aceton 2,1 und Ethylmethylketon 2,7. Durch die hydrophile Eigenschaft der Ketone wird die Lauge aus dem Bauteilinneren schneller an die Oberfläche gebracht. Da beide Flüssigkeiten miteinander sehr gut mischbar sind, wird die Verdunstungszahl des Wassers, in dem das Natriumhydroxid gelöst vorliegt, stark herabgesetzt. Es verdunstet gemeinsam mit dem Keton und hinterlässt dabei die beschriebenen Rückstände. Auch Toluol hat eine relativ niedrige Verdunstungszahl, was zunächst auch das Hinterlassen von Rückständen vermuten lässt. Durch die schlechte Mischbarkeit mit Wasser wird die Lauge jedoch abgestoßen und verbleibt im inneren des Bauteils wodurch zunächst das Toluol separat verdunstet und die Lauge hinterlässt. Diese kann wie gewohnt ablaufen und nur sehr langsam verdunsten bzw. durch den Nutzer abgetrocknet werden. Bei der Nachbehandlung mit Chemikalien, besonders mit Ketonen, ist demnach darauf zu achten, dass auch das Bauteilinnere vollständig getrocknet ist. Da die Erfahrungen zeigen, dass die beschriebenen Ablagerungen auch ohne die Nachbehandlung – wenn auch in abgeschwächter Form – entstehen können, ist gerade bei hohen Temperaturen die Auswaschflüssigkeit regelmäßig vom noch trocknenden

Bauteil abzuwischen. So wird verhindert, dass sie auf der Oberfläche verdunstet. Dass die Ablagerungen grundsätzlich möglich sind, zeigt ein Versuch mit je 10 ml der Lösemittel und 10 ml der Lauge. Diese werden gemischt und unter Raumbedingungen über drei Tage verdunstet. Zurück bleiben die in Bild 3-22 zu sehenden Rückstände am Becherglasboden. Da auch bei der Mischung mit Toluol Ablagerungen auftreten, ist zu folgern, dass dies auch ohne Lösemittel passiert. Zudem ist ebenfalls ein weißlicher Belag zum Beispiel an dem Deckel der Auswaschstation und auf Oberflächen, auf die die Lauge getropft ist, festzustellen. Auch das bestätigt die Theorie.

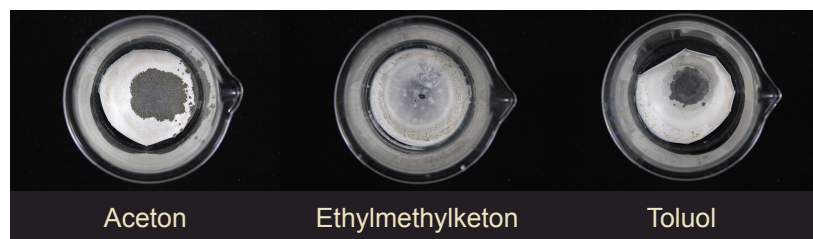


Bild 3-22: Verdunstung von Gemischen

3.5 Einfluss auf die Form- und Maßhaltigkeit

Neben den optischen Einflüssen spielt die Maßhaltigkeit bei der Herstellung von Bauteilen eine wesentliche Rolle. Im Folgenden soll demnach überprüft werden, ob die Maßhaltigkeit durch die Nachbehandlung beeinflusst wird. Dabei erfolgt ein Vorher-Nachher-Vergleich. Dieser geschieht nicht unter Berücksichtigung der Soll-Werte, da diesbezüglich grundsätzlich durch das Verfahren Abweichungen bestehen. Betrachtet werden Maße in x-, y- und z-Richtung sowie Formen wie beispielsweise Bohrungen oder Stege.

3.5.1 Maßhaltigkeit in x-y-Ebene

Zur Bewertung der Maßhaltigkeit in der x-y-Ebene wird eine Pyramide mit quadratischer Grundfläche verwendet. Bild 3-23 zeigt exemplarisch einen unbehandelten Probekörper. Für jede Chemikalie werden drei dieser Bauteile vermessen.

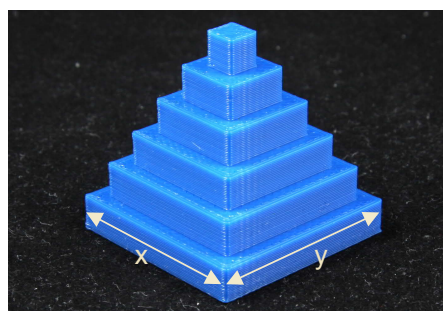


Bild 3-23: Unbehandelte Pyramide

Ausgehend von einer Basis mit $30 \times 30 \text{ mm}^2$ erfolgt eine Reduzierung der Kanten um je 5 mm in Stufen von ebenfalls 5 mm. Die sechste und letzte Stufe weist somit eine Grundfläche von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ auf. Die Messungen erfolgen mithilfe zwei verschiedener Bügelmessschrauben. Eine für den Bereich von 0 – 25 mm, die andere für 25 – 50 mm. Beide erfüllen bei der Überprüfung mit Endmaßen die Fehlergrenzen nach DIN 863-1 für diese Messbereiche von $4 \text{ }\mu\text{m}$ [169]. Durch dreimalige Kontrolle wird jede Messung abgesichert. Gemessen werden die einzelnen Stufen jeweils am Mittelpunkt jeder Seitenfläche. Bild 3-24 stellt die Ergebnisse dar. Abgebildet ist die prozentuale Veränderung durch die Nachbehandlung. Die Messungen in x- und y-Richtung sind zusammengefasst. Da die Standardabweichung der Werte von jeder Stufe in einer Richtung vergleichbar mit der Standardabweichung einer Stufe in beide Richtungen ist, kann auf das einzelne Aufzeigen verzichtet werden. Insgesamt sind die Standardabweichungen sehr gering. Der maximale Wert liegt bei $46 \text{ }\mu\text{m}$ für 30 mm Kantenlänge und Toluolnachbehandlung. Das entspricht einer prozentualen Abweichung von 0,15 %. Durchschnittlich beträgt die Standardabweichung lediglich $19 \text{ }\mu\text{m}$.

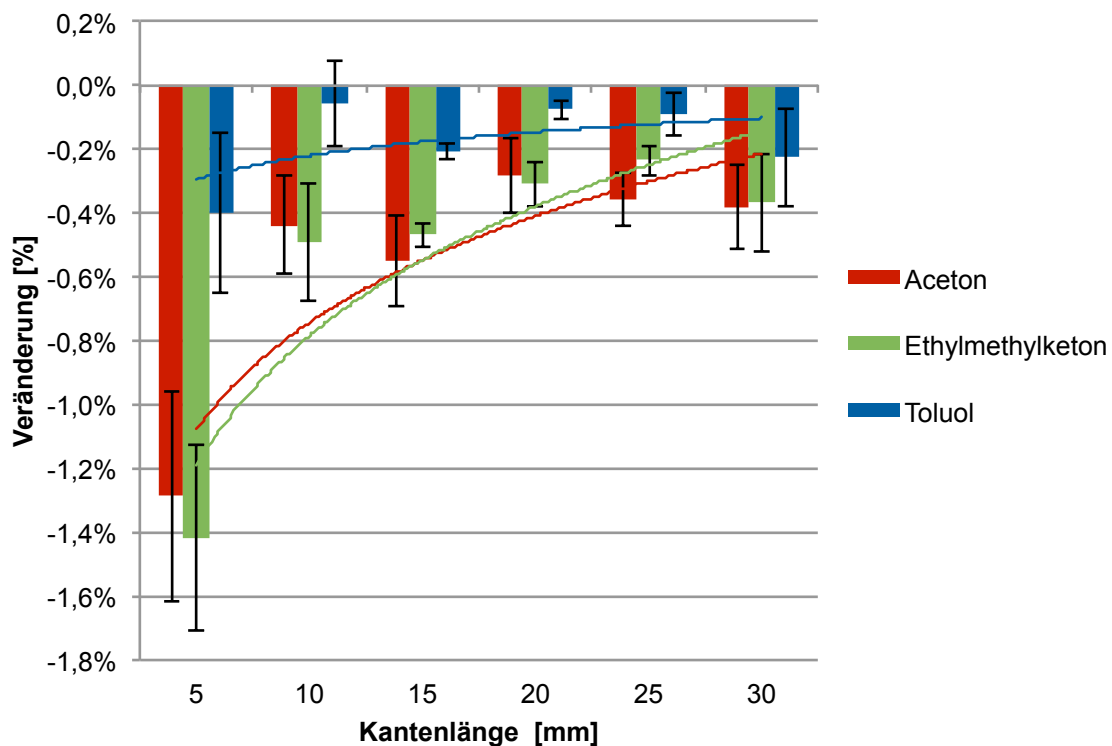


Bild 3-24: Maßabweichungen in der x-y-Ebene

Neben den gemittelten Veränderungen der jeweiligen Chemikalie für die sechs Stufen der Pyramide stellt die Abbildung die logarithmischen Trendlinien dar. Diese zeigen deutlich, dass die Abweichungen tendenziell mit zunehmender Grundlänge abnehmen. Insgesamt ist Toluol mit Abstand das Mittel, was die Maßhaltigkeit am geringsten beeinflusst. Hier beträgt die Abweichung vom Ausgangszustand im Mittel nur $27 \text{ }\mu\text{m}$. Dies entspricht einer Differenz von 0,18 %. An einem Bauteil ist die Ver-

änderung sogar positiv. Bei Aceton und Ethylmethylketon entspricht der Wert mit 0,55 % ca. 70 bis 75 μm , also fast dem Dreifachen. Die Unterschiede sind mit der Aggressivität der Medien zu erklären. Grundsätzlich spielen verschiedene Faktoren bei der Maßabweichung eine Rolle. Zunächst wird die Oberfläche geglättet. Da die taktile Messung durch die große Auflagefläche auch die Rauheitsspitzen beinhaltet, entsteht hier die erste Reduzierung der Abmaße. Dieser Faktor ist jedoch bei allen Medien ähnlich, da eine vergleichbare Rauheit erzielt wird. Des Weiteren kommt es zu einer Quellung und letztlich unter Umständen zur Ablösung einzelner Moleküle. Dies ist bei Aceton und Ethylmethylketon durch eine Verfärbung der Flüssigkeit festzustellen. Neben der Maßzunahme durch die Quellung gibt es bei diesen Medien also auch eine weitere Reduzierung durch eine abtragende Wirkung. Diese ist bei Toluol zumindest bei der angewendeten Eintauchzeit nicht vorhanden. Bei Toluol gleichen sich demnach Glättung und Quellvorgang nahezu aus. Die Ketone sorgen durch ihre stärkere Lösung für weitere Maßabweichungen. Der grundsätzliche Rückgang der Veränderung mit zunehmender Ausgangslänge ist mit der Wirkung auf die oberflächennahen Bereiche zu erklären. Bezogen auf die Ausgangslänge wird der prozentuale Einfluss demnach geringer. Ein ebenfalls zu berücksichtigender Aspekt ist die Messung selbst. Zum einen befinden sich die Unterschiede nahe der Fehlergrenze der Messmittel und sind somit mit entsprechender Rücksicht darauf zu interpretieren. Zum anderen rückt der Messpunkt mit abnehmender Kantenlänge immer weiter an den Rand der Flächen. Bei einer Kantenlänge von 5 mm ist die Anpressfläche der Bügelmessschraube unmittelbar an der Bauteilkante. Da unter Umständen Effekte in Kantennähe die Veränderung beeinflussen, ist das extreme Ausmaß bei diesen Flächen darauf zurückzuführen. Die grundsätzliche Tendenz kann dennoch bestätigt werden. Ebenso die Tatsache, dass die Abweichungen vom Ausgangszustand weit unter den eigentlichen Toleranzen des Verfahrens liegen und somit für die Auslegung von Bauteilen nicht beachtet werden müssen.

3.5.2 Maßhaltigkeit in z-Richtung

Abweichungen vom ursprünglichen Bauteil in z-Richtung werden anhand eines Probekörpers in Treppenform überprüft. Bild 3-25 zeigt einen unbehandelten Testkörper.

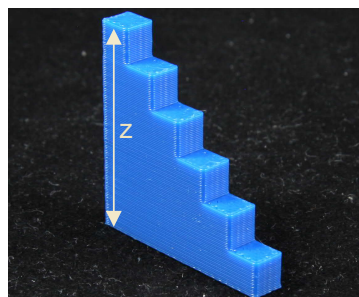


Bild 3-25: Unbehandelte Treppe

Jede Stufe hat eine Grundfläche von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ sowie eine Höhe von jeweils 5 mm. Die Vermessung erfolgt erneut mit Bügelmessschrauben und im Mittelpunkt jeder Stufe. Für jede Chemikalie stehen drei Bauteile zur Verfügung und jede Fläche wird zur Absicherung von Messfehlern dreifach vermessen. Die Ergebnisse sind in Form der Vorher-Nachher-Abweichung in Bild 3-26 dargestellt.

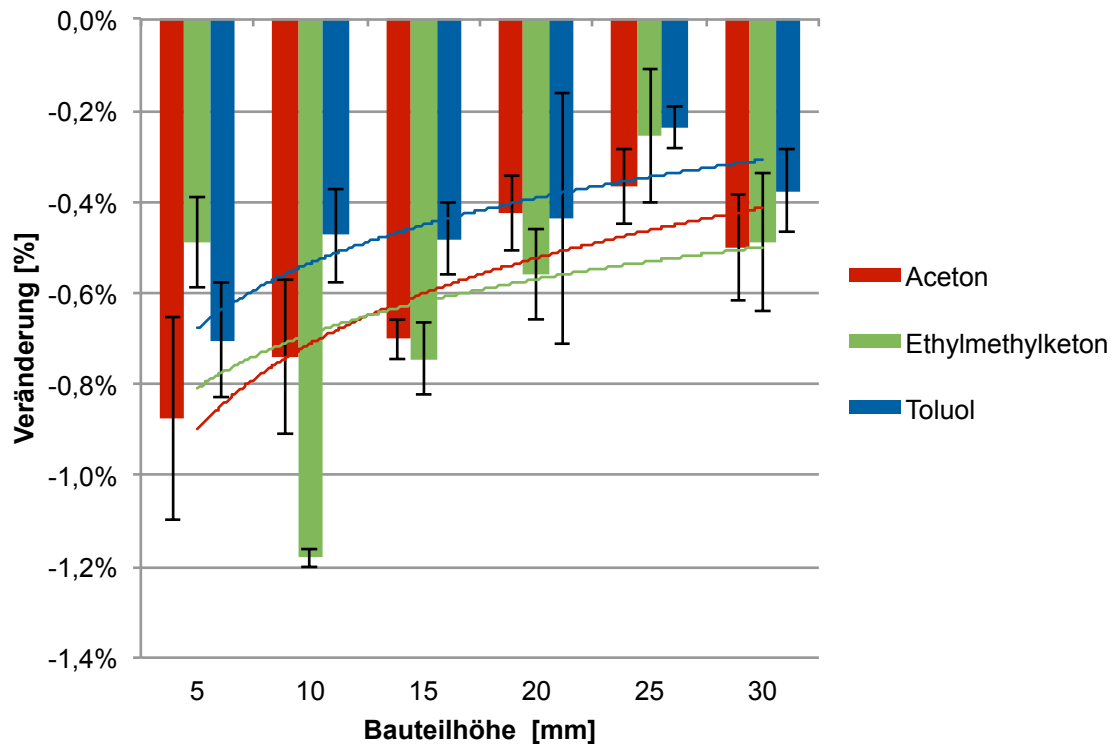


Bild 3-26: Maßabweichungen in z-Richtung

Die Standardabweichungen sind mit durchschnittlich 0,12 % für Toluol und Aceton sowie 0,1 % für Ethylmethylketon vergleichbar mit denen in x-y- Richtung und relativ gering. Die Trendlinien verhalten sich ebenfalls vergleichbar und stellen Toluol mit dem geringsten Einfluss heraus. Auch zeigen sie erneut, dass die prozentuale Abweichung mit zunehmender Bauteilgröße abnimmt. Dies ist wieder auf die Auswirkung der Nachbehandlung im Bereich der Oberflächen zu erklären. Auffällig ist der nur geringe Unterschied der drei Medien zueinander. Dies ist damit zu erklären, dass die Oberfläche der x-y-Ansicht weit „offener“ ist und demnach auch das weniger aggressive Toluol auf größere Bereiche einwirken kann. Die Ketone hingegen sorgen durch die schnelle Wirkung für ein Schließen der Bereiche und dringen dabei wahrscheinlich nicht so tief ein, was ihre Wirkung reduziert. Insgesamt ist die größere Auswirkung in z-Richtung mit der offeneren Oberfläche zu erklären. Die Abweichung ist mit durchschnittlich 70, 98 und 94 μm für Toluol, Ethylmethylketon und Aceton höher als in x-y-Ebene. Durch das generelle Übermaß in z-Richtung unterschreiten die Maße jedoch nie das Sollmaß, wodurch die Nachbehandlung für eine Annäherung an dieses sorgt. Der im Vergleich zur x-y-Ebene geringere Unterschied zwi-

schen den ersten beiden Stufen ist mit der Messfläche bzw. der zur Verfügung stehenden Anpressfläche für die Bügelmessschrauben zu erklären. Während für die Messung in x-y-Ebene nur bei der kleinsten Stufe eine sehr kleine Auflagefläche zur Verfügung steht, ist dies bei dem Testkörper Treppe auf jeder Stufe so, zumindest auf einer Seite der Messfläche. Insgesamt ist auch für die Abweichung in z-Richtung festzuhalten, dass der Einfluss durch die Nachbehandlung nur sehr gering ist und ebenfalls unterhalb der Verfahrenstoleranzen liegt. Tendenziell kann die Abweichung aufgrund des vorhandenen Übermaßes im Ausgangszustand als positiv gewertet werden. Dennoch ist sie so gering, dass eine Beachtung bei der Bauteilauslegung für das FLM mit Nachbearbeitung kaum notwendig erscheint.

3.5.3 Formhaltigkeit

Unter Formhaltigkeit wird eine möglichst geringe Formabweichung verstanden. Diese beschreibt die Abweichung eines Formelements von seiner idealen Form [170]. Inwiefern die chemische Nachbehandlung Auswirkungen auf diese Eigenschaften hat, wird zunächst anhand der Kantenverrundung in Anlehnung an DIN 13715 bewertet. Diese beschreibt den zu bestimmenden Wert a als Maß der Abtragung, wie in Bild 3-27 dargestellt. [171]

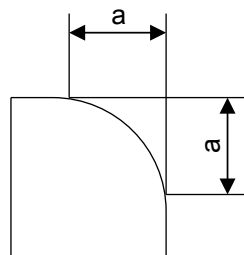


Bild 3-27: Maß der Abtragung [171]

Relevant ist dabei erneut nicht die Abweichung vom Soll, also dem CAD-Modell, sondern von einem unbehandelten Körper. Daher wird vor und nach der Behandlung eine Aufnahme der jeweiligen Geometrie mit einem digitalen Mikroskop der Firma Di-Li erstellt und mithilfe der Software TSView vermessen. Am Probekörper Pyramide erfolgt die Aufnahme von drei Kanten der größten Stufe in der x-y-Ebene. Für Kanten in Baurichtung wird der Probekörper Treppe von der Seite betrachtet. Bild 3-28 zeigt die prozentuale Veränderung des Maßes der Abtragung in x-y-Ansicht. Die stärkere Auswirkung der Ketone auf die Form wird bestätigt. Bei Toluol schwankt der Wert der drei Bauteile auch in eine positive Abweichung. Deutlich ist der Zusammenhang zur Maßabweichung. Durch die schon im Ausgangszustand vorherrschenden Werte von a mit einem Durchschnitt von 0,69 mm ist eine schon abgerundete Kante vorhanden. Bei der Reduzierung der Außenmaße wird demnach auch die Rundung durch die

stärkere Auswirkung der Ketone reduziert, also scharfkantiger geformt. Allerdings darf auch hier der Wert von 10 % nicht überinterpretiert werden. Das Maß der Abtragung ändert sich durchschnittlich lediglich um 77 μm . Bild 3-29 zeigt die starke optische Ähnlichkeit von je einem Bauteil in unbehandeltem bzw. nachbehandeltem Zustand mit den drei Mitteln inklusive der digitalen Vermessung.

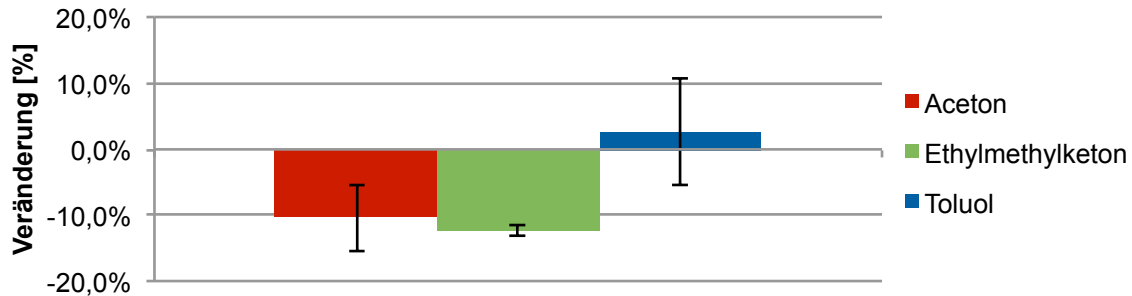


Bild 3-28: Auswirkung auf das Maß der Abtragung

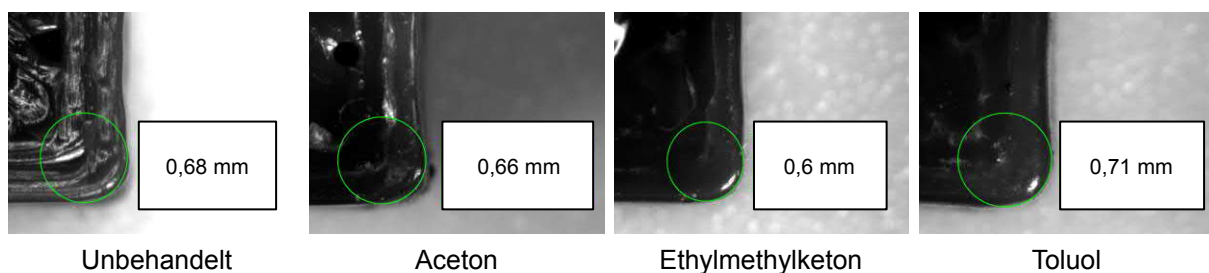


Bild 3-29: Kantenverrundung in x-y-Ansicht

In der Seitenansicht erfolgt die Vermessung der Kanten anhand des treppenförmigen Probekörpers. Der Wert für a ist im Ausgangszustand mit durchschnittlich 0,2 mm wesentlich geringer als in der x-y-Ansicht. Er ist lediglich durch den ABS Drahtdurchmesser bestimmt. Aufgrund der ovalen Form ist dieser optisch nur sehr schwer zu vermessen. Die Ergebnisse sind durch das grundlegend unterschiedliche Erscheinungsbild demnach nicht vergleichbar und werden nicht weiter betrachtet. Insgesamt kann die Kantenverrundung damit als minimal eingestuft werden. Scharfkantige Bauteile sind ohnehin durch das FLM nicht herstellbar. Ein minimaler Unterschied zum Ausgangszustand schränkt den Einsatz der Bauteile keinesfalls ein.

Um dennoch vorhandene Einschränkungen zu verdeutlichen, soll anhand des in Bild 3-30 dargestellten Prüfkörpers das Verhalten an Löchern und Stegen präsentiert werden. Dabei wird auf eine quantitative Auswertung verzichtet. Es soll dem Aufzeigen der grundsätzlichen Problematik anhand von Beispielen dienen. Zwar werden vereinzelt auch digitale Messungen durchgeführt, doch soll der visuelle Vergleich in diesem Fall genügen.

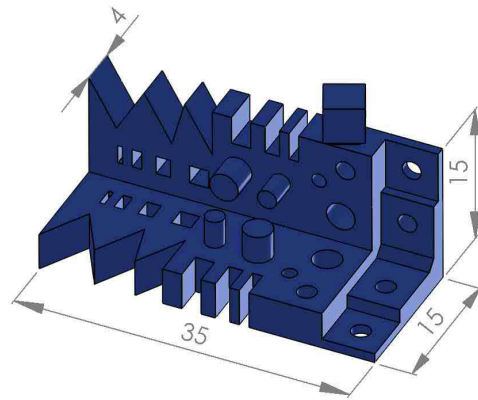


Bild 3-30: Probekörper zur Feststellung von Formabweichungen

Bei der gesamten Betrachtung fällt auf, dass die Ketone durch ihre schnelle und aggressive Wirkung den größten Einfluss und hinsichtlich kleiner Geometrien die größte Einschränkung aufweisen. Bei solch kleinen Formen zeigt jedoch auch Toluol eindeutige Auswirkungen auf die Beständigkeit. So zeigt beispielsweise Bild 3-31 das Verhalten an einem im CAD-Modell $2 \times 2 \text{ mm}^2$ großen Durchbruch in einer 4 mm dicken Bauteilwand.

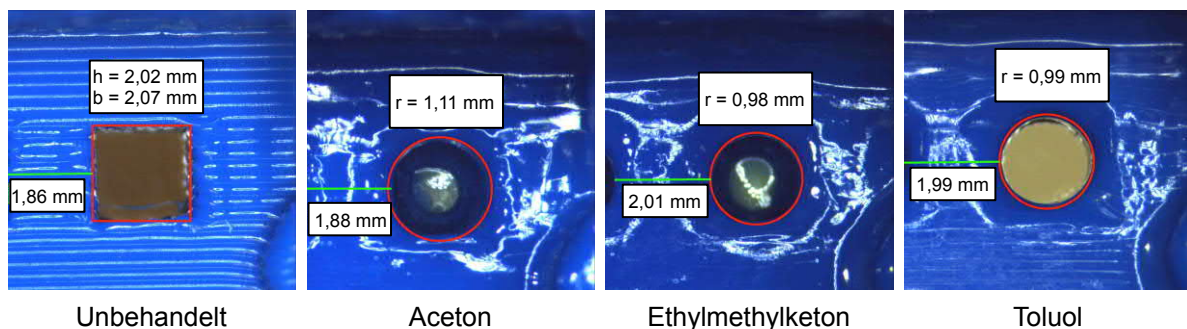


Bild 3-31: Auswirkung auf einen Durchbruch

Der im unbehandelten Zustand deutlich rechteckige Durchbruch stellt sich im behandelten Zustand vielmehr als Bohrung mit einem Durchmesser von ca. 2 mm dar. Diese Bohrung weist allerdings nur bei Toluol einen relativ homogenen Durchmesser auf. Bei den Ketonen zeigt sich durch die stärkere Einwirkung ein Verschieben einzelner Moleküle in den Bohrungsbereich, die dort durch Trocknung aushärten und die Bohrung verjüngen. Bei kleineren Durchbrüchen zeigt sich dieses Verhalten noch deutlicher, bis hin zu einem kompletten Verschluss bei einer ursprünglichen Durchgangsbreite von 1 mm bei den Ketonen und 0,5 mm bei Toluol. Die Ausprägung ist in beiden Orientierungen sehr ähnlich. Auch an ursprünglich kreisförmigen Durchgängen mit geringerer Wandstärke kann das Phänomen beobachtet werden, wie Bild 3-32 zeigt. Hier ist ein Durchgangsloch mit einem Durchmesser von 2 mm bei einer Wandstärke von nur 1 mm dargestellt. Wieder ist bei Toluol ein eindeutiger Durch-

gang zu sehen, der einen konstanten Radius von ca. 0,8 mm hat. Bei den Ketonen ist schon zu Beginn ein geringerer Radius vorhanden, der sich dann schnell verjüngt und schließlich den Durchgang verschließt. In der zweiten Orientierung ist die Ausprägung nahezu identisch.

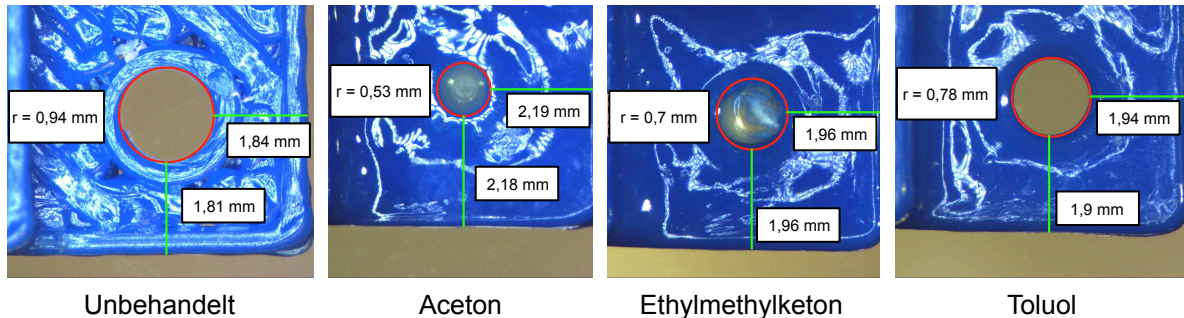


Bild 3-32: Auswirkung auf einen kreisförmigen Durchbruch

Als letztes Beispiel für den negativen Einfluss auf filigrane Strukturen dienen Stege mit Lücken, wobei die Stege Breiten von 1 und 1,5 mm bzw. die Lücken 1, 1,5 und 2 mm aufweisen. Sie gehen je über eine Tiefe von 4 mm und haben eine Höhe von 3 mm. Die Auswirkungen der Nachbehandlung sind in Bild 3-33 zu sehen.

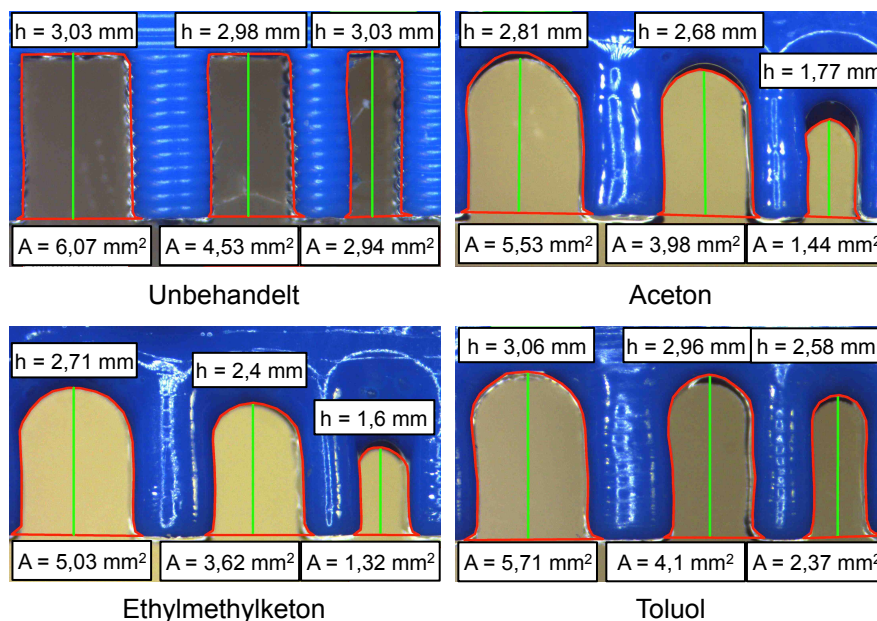


Bild 3-33: Auswirkung auf Stege

Deutlich sind Abrundungen im Steggrundbereich zu sehen. Zum anderen nimmt die Steghöhe mit abnehmender Lückenbreite deutlich ab. Diese Effekte sind erneut bei Toluol am geringsten ausgeprägt. So kann zusammengefasst werden, dass Toluol bei relevanten Details im Bauteil zu bevorzugen ist. Dies ist vor allem für Strukturen relevant, in denen sich die Chemikalie sammeln und nur schlecht abfließen kann.

Bohrungen, Durchbrüche oder Engstellen, wie bei den Stegen sind besonders anfällig. Sobald die Chemikalie gut abfließen kann, ist die Auswirkung der Nachbehandlung wieder wie vorher beschrieben sehr gering. Exemplarisch dafür sind in Bild 3-34 zwei dünne Zylinder mit einem Durchmesser von 2 bzw. 3 mm Durchmesser in unbehandeltem und mit Aceton behandeltem Zustand dargestellt. Deutlich ist zu sehen, dass bei keinem der Zylinder eine deutliche und relevante Veränderung der Form eintritt.

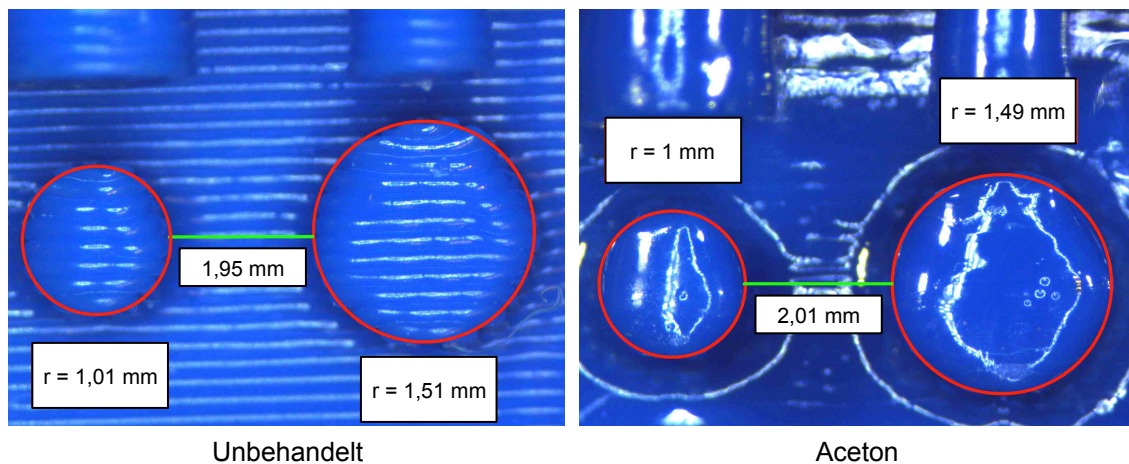


Bild 3-34: Auswirkung auf Zylinder

Aus den Ergebnissen zur Maß- und Formhaltigkeit kann insgesamt geschlossen werden, dass der Einfluss der chemischen Nachbehandlung mit den eingesetzten Mitteln vernachlässigbar gering ist, wenn nur äußere Strukturen relevant sind. Die Veränderungen durch die Nachbehandlung liegen alle unterhalb der eigentlichen Fertigungstoleranzen. Mit dem geringsten Einfluss zeigt sich bei allen Probekörpern die Nachbehandlung mit Toluol, auch bei der Kantenverrundung und den kritischen Innenbereichen. Diese sind grundsätzlich eine Schwachstelle der chemischen Nachbehandlung. In Bereichen, in denen die Medien schlecht abfließen können, wirken sie länger ein und lösen somit den Kunststoff stärker an. Es kommt zu einer zähflüssigen Lösung, die das Abfließen weiter erschwert. Dadurch kommt es erst durch die Verdunstung zur Aushärtung und eine wesentlich stärkere Verformung findet statt. Dieser Effekt ist bei dem schwächer wirkenden Toluol am geringsten ausgeprägt. Die Lösung von Kunststoffmolekülen ist so gering, dass auch in schwer zugänglichen Stellen ein besseres Abfließen möglich ist. Komplexe außenliegende Strukturen werden auch von den Ketonen nicht stark beeinflusst. Demnach ist für eine gleichmäßige Glättung von komplexen Strukturen mit Innengeometrien ein eher langsam wirkendes Medium, wie in diesem Fall Toluol zu wählen. Bei weniger komplexen Strukturen sind die Ketone ausreichend, wobei aus wirtschaftlichen Gründen Aceton zu bevorzugen ist.

3.6 Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften

Nach der Betrachtung des wesentlichen Zieles der chemischen Nachbehandlung, also der Qualität der Oberflächen sowie der Auswirkungen auf Farbe, Form- und Maßhaltigkeit, sollen im Folgenden Untersuchungen zum Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften dargestellt werden. Die grundlegende Frage ist dabei, ob die positiven Aspekte der Glättung mit negativen Einflüssen auf die Bauteile einhergehen, die den Einsatz möglicherweise einschränken könnten. Andererseits ist durchaus eine Verbesserung der Eigenschaften durch die Oberflächenveränderung denkbar. Neben der Härte und den gängigen Zugeigenschaften werden Eindringtiefe, Dichte sowie die Gasdichtigkeit betrachtet.

3.6.1 Härtemessungen nach Shore D

Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaft einer Oberfläche wird in der Regel der Härtebegriff herangezogen. Als Härte wird der Widerstand eines Werkstoffes gegenüber dem Eindringen eines härteren Körpers definiert [172] [173]. Zur Bestimmung dieser Werkstoffeigenschaft stehen für Kunststoffe und Hartgummi verschiedene, genormte und nicht genormte Prüfverfahren zur Verfügung, wobei eine Vergleichbarkeit nur unter Einhaltung des Verfahrens und aller Versuchsparameter gegeben ist. Unter anderem kommen die Eindringverfahren zur Ermittlung der Shore A oder Shore D Werte zum Einsatz. Dabei wird ein Kegel bzw. Kegelstumpf verwendet, der in das Material eindringt. Für die Auswahl werden Tabellenwerte herangezogen, die für ABS die Bestimmung von Shore D als geeignet erscheinen lassen. Bei der Prüfung bringt eine Feder mit definierter Kennlinie mithilfe der Prüfkraft einen Kegel zum Eindringen in das zu testende Material. Aus Prüfkraft und Eindringtiefe ermittelt das Prüfgerät die Shore D Härte und zeigt diese an. [174] [175] Die Problematik der fehlenden Möglichkeit zur Klimatisierung nach DIN EN ISO 291 [136] wird durch identische Lagerung aller Proben und eine vergleichende Auswertung der unterschiedlich be- bzw. unbehandelten Proben umgangen. Neben den mitgeprüften Referenzkörpern sollen Literaturwerte als Vergleich herangezogen werden. Diese liegen für die konventionelle Fertigung zwischen 75 und 80 Shore D [174]. Bei FLM-Bauteilen sind keine Herstellerangaben verfügbar. Bislang wurde die Härte von FLM-Bauteilen auch in der Forschung kaum betrachtet. Untersuchungen erfolgten durch Singh, der die in dieser Arbeit zu messenden Flächen mit einer Shore D Härte von 78 bis 81 beschreibt. [176] Aus der Fügetechnik ist bekannt, dass Lösemittel auch nach einigen Tage nicht vollständig ausdiffundiert sind und somit die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Der gerade zum Ende hin sehr langsame Diffusionsprozess resultiert aus dem immer kleiner werdenden Konzentrationsunterschied zwischen Lösemittel und umgebender Luft. [153] Um das Ausdiffundieren zu berücksichtigen, erfolgen Prüfungen in Abständen mehrerer Tage. Als Probekörper wird das in

Bild 3-35 dargestellte Bauteil verwendet. Die Maße ermöglichen den in DIN EN ISO 868 geforderten Mindestabstand vom Mittelpunkt der Spitze des Eindringkörpers zum Rand des Prüflings von 9 mm sowie die Mindestdicke von 6 mm [175].

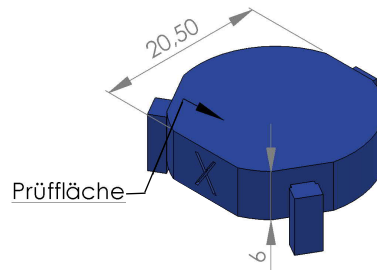


Bild 3-35: Prüfkörper zur Bestimmung der Härte

Für jedes Behandlungsmittel sowie für den unbehandelten Zustand werden jeweils drei Bauteile hergestellt und somit drei Messreihen pro Zustand ermöglicht. Die angegebenen Härtegrade sind jeweils Durchschnittswerte aus fünf Einzelmessungen. Bild 3-36 zeigt die absoluten Ergebnisse der ersten Messreihe, die nach 3, 6, 10, 18 und 21 Tagen vermessen wurde.

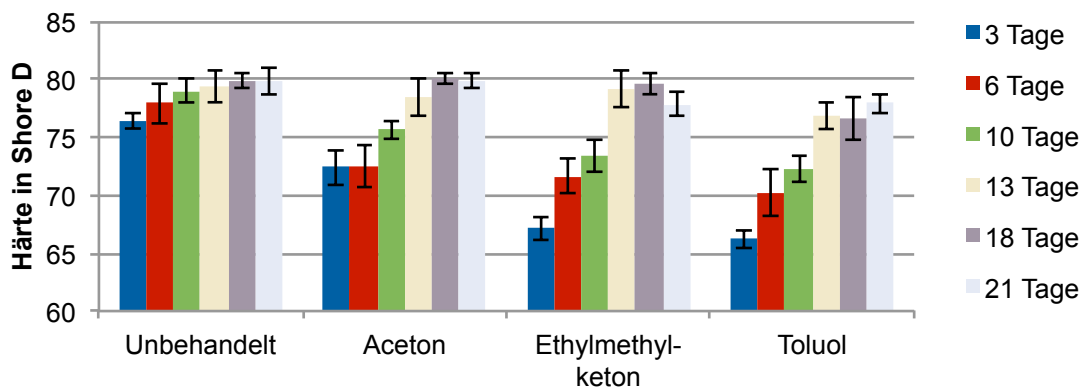


Bild 3-36: Shore D Härte der ersten Messreihe

Die Standardabweichungen der Messungen sind mit einem Maximalwert von 2 Härtegraden gering. Es kann demnach von repräsentativen Werten ausgegangen werden. Des Weiteren unterscheiden sich die Abweichungen der unterschiedlichen Zustände kaum. Deutlich wird, dass zwischen unbehandelten und behandelten Proben Unterschiede bezüglich der Härtegrade bestehen. Während unbehandelte Proben von der ersten Messung an einen Wert innerhalb der Literaturangaben annehmen, liegen nachbehandelte Proben bis zum 13. Tag nach der Behandlung teils deutlich darunter. Hier zeigt sich deutlich der Einfluss durch die Erhöhung des Molekülabstandes und die Steigerung der Molekülbeweglichkeit. Zudem kann anhand dieser Werte die Reversibilität verdeutlicht werden, die jedoch nur langsam vonstatten geht. Dass die unbehandelten Proben ebenfalls eine Härteveränderung vollziehen, kann

mit der Lösung zur Entfernung der Supports zusammenhängen. Zwar wurde eine ausreichende Zeit zur Trocknung gewartet, jedoch ist nicht komplett auszuschließen, dass Quellvorgänge durch dieses Mittel entstehen. Eine andere Erklärung sind Umwelteinflüsse, also schwankende Temperaturen. Um diese aus der Betrachtung zu eliminieren, folgt in Bild 3-37 die Darstellung der prozentualen Unterschiede zum unbehandelten Bauteil am entsprechenden Tag.

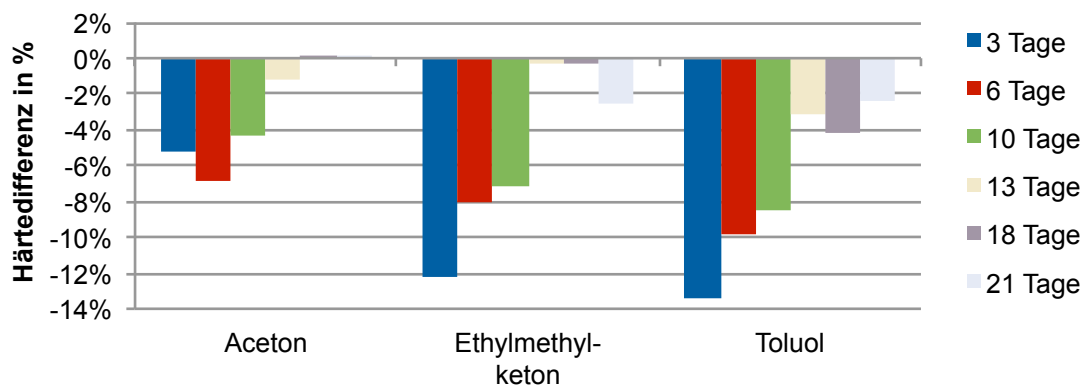


Bild 3-37: Härte­differenz zum unbehandelten Bauteil der ersten Messreihe

Diese Darstellung zeigt deutlich, dass Toluol die größten Einflüsse hat und auch nach drei Wochen noch Unterschiede in der Härte bewirkt. Die Erklärung kann in der Eindringtiefe der Medien vermutet werden. Die sehr aggressiven Ketone führen zu einer sehr schnellen Lösung der Moleküle im Oberflächenbereich, wodurch die zähe Masse die offene Struktur des FLM-Bauteils schließt. Zudem ist die Einwirkzeit nur sehr kurz. Toluol hingegen hat wesentlich länger die Möglichkeit weiter ins Bauteil einzudringen und somit einen größeren Einfluss auf die Härte auszuüben. Die geringe Absenkung bei Ethylmethylketon am Tag 21 kann eine Überlagerung mehrerer Einflüsse wie Umwelt- oder Messeinflüsse sein. Bezogen auf die absoluten Werte ist der Härteunterschied jedoch nur sehr gering. Zur Absicherung der Ergebnisse erfolgt die Betrachtung der zweiten Messreihe. Diese ist in Bild 3-38 dargestellt.

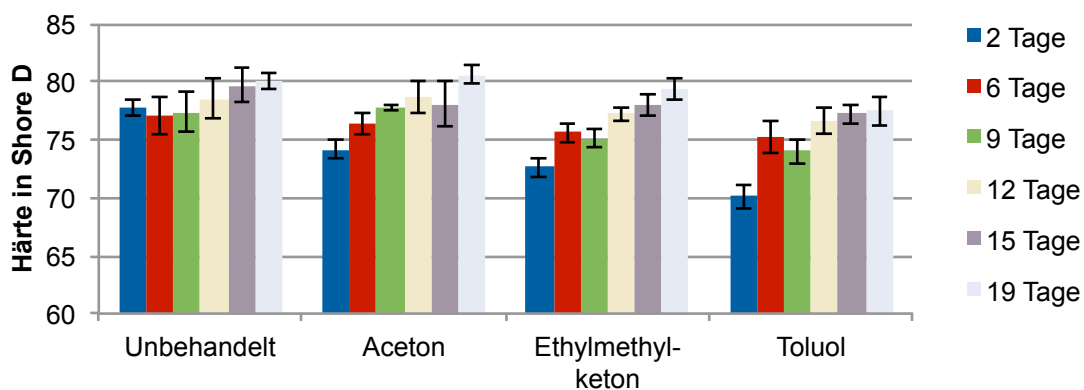


Bild 3-38: Shore D Härte der zweiten Messreihe

Die Unterschiede der Intervalle zwischen den einzelnen Messungen im Vergleich mit der ersten Messreihe sind dabei vernachlässigbar, da die Messreihen nicht verglichen werden, sondern lediglich eine allgemeine Tendenz aufzeigen sollen. Die Standardabweichungen sind vergleichbar mit der ersten Messreihe. Die Absolutwerte sind mit ca. zwei bis vier Härtegraden leicht oberhalb der ersten Messreihe. Zurückzuführen sind die Unterschiede wahrscheinlich auf Umgebungsbedingungen. Daher erfolgt erneut die Betrachtung der prozentualen Differenzen der behandelten Bauteile zur unbehandelten Referenz in Bild 3-39.

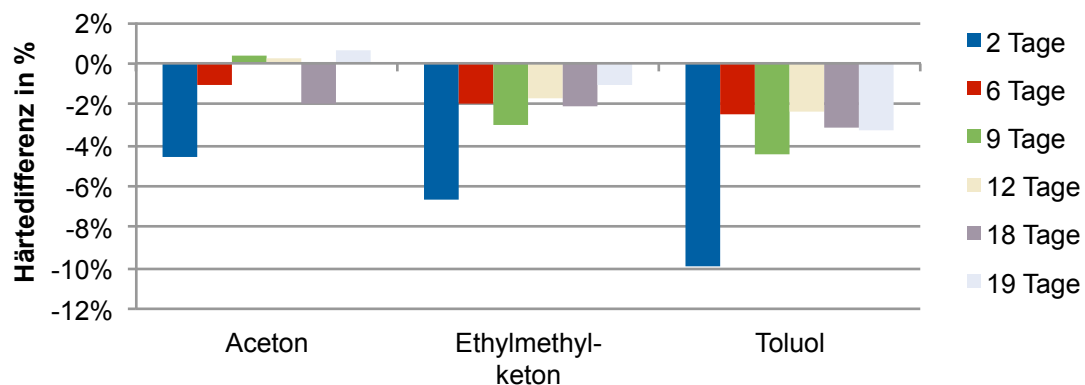


Bild 3-39: Härte­differenz zum unbehandelten Bauteil der zweiten Messreihe

Die Ergebnisse sind vergleichbar mit der ersten Messreihe, wobei eine schnellere Angleichung an den unbehandelten Zustand stattfindet. Das spricht für die Umgebungseinflüsse. Bei höheren Temperaturen erfolgt eine schnellere Verflüchtigung der Lösemittel und somit eine schnellere Reversibilität. Die größten Unterschiede sind wieder bei Toluol, weiterhin auch nach ca. drei Wochen, festzuhalten.

Um einen Einfluss durch die Messungen, also das Zusammendrücken der Bauteile ausschließen zu können, erfolgt an den Bauteilen der dritten Messreihe lediglich eine Messung nach drei Wochen. Die Härte­werte sind für alle Zustände mit nur geringen Schwankungen von 1 % nahezu identisch. Dass auch Toluol kaum vom unbehandelten Zustand abweicht, kann wieder auf Witterungsumstände zurückgeführt werden. Ein Einfluss durch das häufige Messen an einem Bauteil ist nicht gegeben. Demnach kann insgesamt die Schlussfolgerung gezogen werden, dass grundsätzlich ein nur geringer Einfluss auf die Oberflächenhärte stattfindet. Die kurzzeitige Reduzierung von maximal 13,5 % verringert sich bereits auf unter 5 % nach spätestens 13 Tagen innerhalb der durchgeführten Messreihen. Mit den dann erreichten Härtegraden liegen alle Proben innerhalb der Literaturangaben für ABS. Dennoch kann Aceton für möglichst geringe Härteeinflüsse empfohlen werden, was wahrscheinlich an der schnellen Verdunstung und der geringen Eindringtiefe liegt, die durch die schnelle Wirkung möglich ist.

3.6.2 Zugeigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen hängen weit mehr von Einflüssen wie Temperatur, Höhe und Art der Belastung sowie der Belastung durch Chemikalien ab [177]. Auch wenn die Einwirkung von Lösemitteln physikalischer Natur und in der Regel reversibel ist [58], soll am Beispiel der Prüfung auf Zugbelastung ein eventueller Einfluss quantifiziert werden. Die daraus ableitbaren Werte eignen sich gut für die Beschreibung eines Kunststoffes sowie für die Verwendung in der Auslegung von Bauteilen. [177] Neben dem Einfluss der Chemikalien auf die Molekülstruktur, im wesentlichen auf Molekülabstände, kann vor allem die Veränderung der Oberflächenstruktur die Festigkeit in hohem Maße beeinflussen. Gerade in Aufbaurichtung herrschen an den Schichtübergängen enorme Kerbwirkungen, die unter Umständen durch die Behandlung reduziert sind. Grundsätzliche, unterschiedliche Verhaltensweisen von Kunststoffen sind in Bild 3-40 in Form von Spannungs-Dehnungskurven dargestellt.

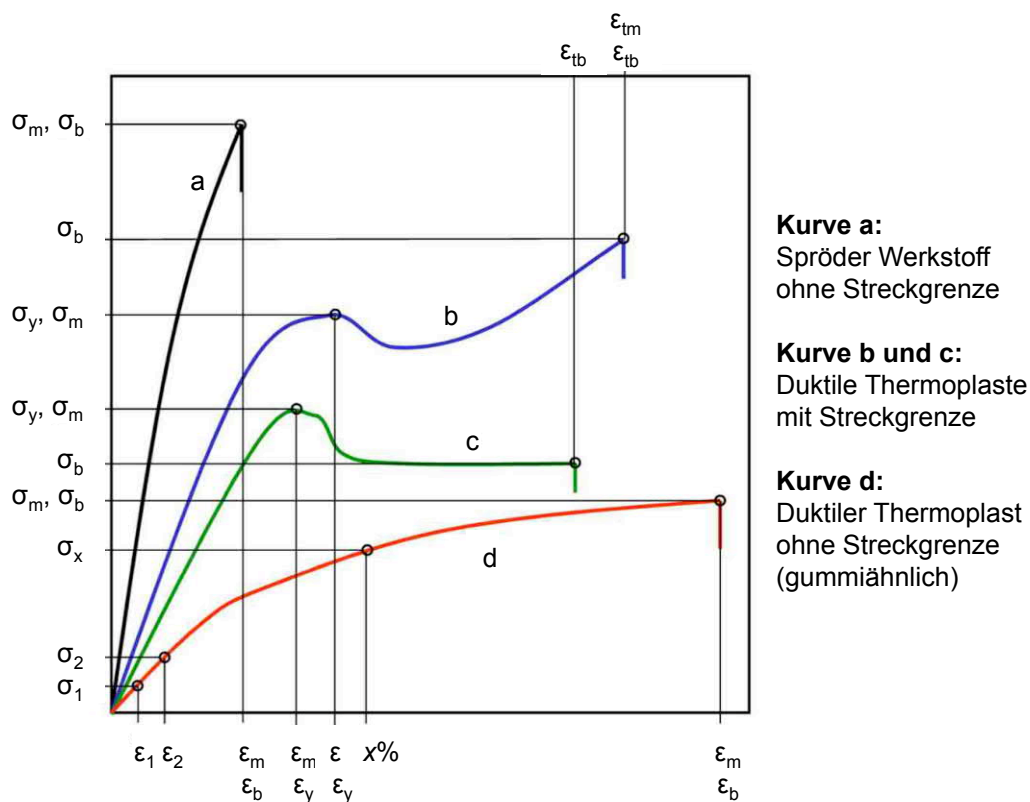
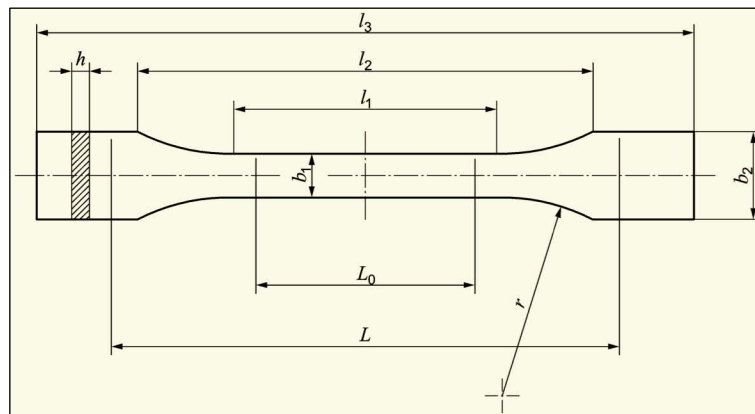


Bild 3-40: Typische Spannungs-Dehnungskurven von Kunststoffen [178] [177]

Kurve a stellt einen spröden Werkstoff dar, der ohne Streckgrenze bricht. Die Streckgrenze ist jener Punkt, an dem ein Zuwachs der Dehnung ohne Anstieg der Spannung vorkommt. Dieser Punkt ist in den Kurven b und c vorhanden. In Kurve d ist erneut keine Streckgrenze vorhanden, jedoch eine so starke Dehnung, dass ein duktiler Thermoplast abgebildet ist. Die Kennwerte, die sich aus dem Diagramm bzw.

dem Versuch ablesen lassen, sind sowohl Dehnungs- und Spannungswerte als auch ableitbare Größen. Spannung und Dehnung treten dabei in der Regel als Wertepaar auf. Für die Beurteilung der Chemikalieneinwirkung werden Zugmodul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit sowie Bruchspannung und Dehnung bei Bruchspannung betrachtet. Das Zugmodul beschreibt als errechneter Wert das Verhalten des Werkstoffes im linearen Bereich. Zugfestigkeit sowie die zugehörige Dehnung beschreiben den Punkt des ersten Spannungsmaximums. Das Wertepaar Bruchspannung- und -dehnung gibt an, bei welcher Spannung und Dehnung die Probe bricht, wenn dies nicht schon bei der Zugfestigkeit geschehen ist. [178] [177] Zur Durchführung der Versuche wird der in Bild 3-41 dargestellte Probekörper nach DIN EN ISO 527-2 verwendet. Vermessungen der Probekörper zeigen, dass sie den Anforderungen an die Maße gerecht werden. Lediglich liegend gebaute Proben weichen in ihrer Breite um maximal 0,3 mm vom Sollwert ab, wobei 0,2 mm zugelassen sind. Das Maß liegt für alle derart orientierten Bauteile in diesem Bereich, wodurch eine Vergleichbarkeit innerhalb der hier durchgeführten Testreihe gegeben ist.



	Maß	Maße in mm
l_3	Gesamtlänge	170
l_1	Länge des engen parallelen Teils	80 ± 2
r	Radius	24 ± 1
l_2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten	$109,3 \pm 3,2$
b_2	Breite an den Enden	$20 \pm 0,2$
b_1	Breite des engen Teils	$10 \pm 0,2$
h	Bevorzugte Dicke	$4 \pm 0,2$
L_0	Messlänge	$75 \pm 0,5$
L	Anfangsabstand der Klemmen	115 ± 1

Bild 3-41: Verwendete Zugprobe nach DIN EN ISO 527-2 [179]

Die charakterisierende Bauweise der additiven Fertigung erwirkt sowohl für metall- als auch für kunststoffverarbeitende Prozesse einen großen Einfluss der Orientierung des Bauteils auf die resultierende Festigkeit. Verantwortlich dafür ist die geringere Haftung von Schicht zu Schicht im Vergleich zur Haftung bzw. dem Zusammenhalt innerhalb einer Schicht. [135] [180] [181] [182] Um die daraus entstehenden anisotropen Festigkeitseigenschaften zu berücksichtigen, werden Zugproben, wie in Bild 3-42 dargestellt, in 0° und 90° Orientierung im Bauraum hergestellt. Bei einer 0° -Orientierung ist von den schlechtesten Eigenschaften auszugehen, während die 90° -orientierten Proben besonders gute Werte hervorbringen. Ausrichtungen, die sich zwischen diesen beiden Extrema befinden, stellen sich auch hinsichtlich ihrer Festigkeitseigenschaften zwischen den Werten der beschriebenen Ausrichtungen ein. [180] [181] [183] Weitere für die mechanischen Kennwerte relevanten Maschinenparameter, wie beispielsweise die Schichtstärke, die Rasterorientierung oder die Spurbreite [115] [120] [184] werden nicht berücksichtigt. So bleiben alle Einstellungen während der Herstellung identisch. Zur Berücksichtigung von Prozessstreuungen sowie möglicher Fehlerquellen bei der Nachbearbeitung, werden wie in DIN EN ISO 527-1 vorgeschrieben, für jede Chemikalie fünf Proben je Orientierung hergestellt [178]. Die Zugstäbe werden nach der Behandlung mit den entsprechenden Lösemitteln zur Trocknung bei Raumklima für 14 Tage und anschließend zur Vorbereitung auf die Zugprüfung bei 23°C und 50 %r.H. nach DIN EN ISO 291 zunächst gelagert und anschließend geprüft [136]

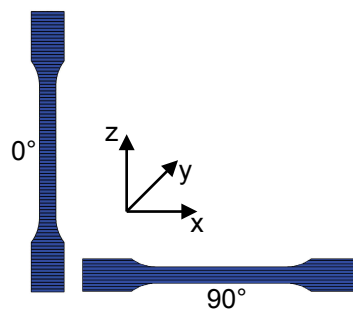


Bild 3-42: Orientierung der Zugproben im Bauraum

Um nicht auf Referenzen aus der Literatur zurückgreifen zu müssen sowie für eine bessere Vergleichbarkeit bezüglich der Rahmenbedingungen der Herstellung und der Zugprüfungen, werden neben den nachbehandelten auch unbehandelte Proben gezogen. Auf einen Vergleich der Messergebnisse mit den zahlreichen in der Literatur verfügbaren Ergebnissen unbehandelter Proben soll an dieser Stelle verzichtet werden.

Für eine erste Übersicht erfolgt die Normierung der Werte in behandeltem Zustand auf die entsprechende Orientierung in unbehandeltem Zustand. Die in Bild 3-43 dargestellten Werte dienen demnach nicht dem Vergleich der beiden Orientierungen.

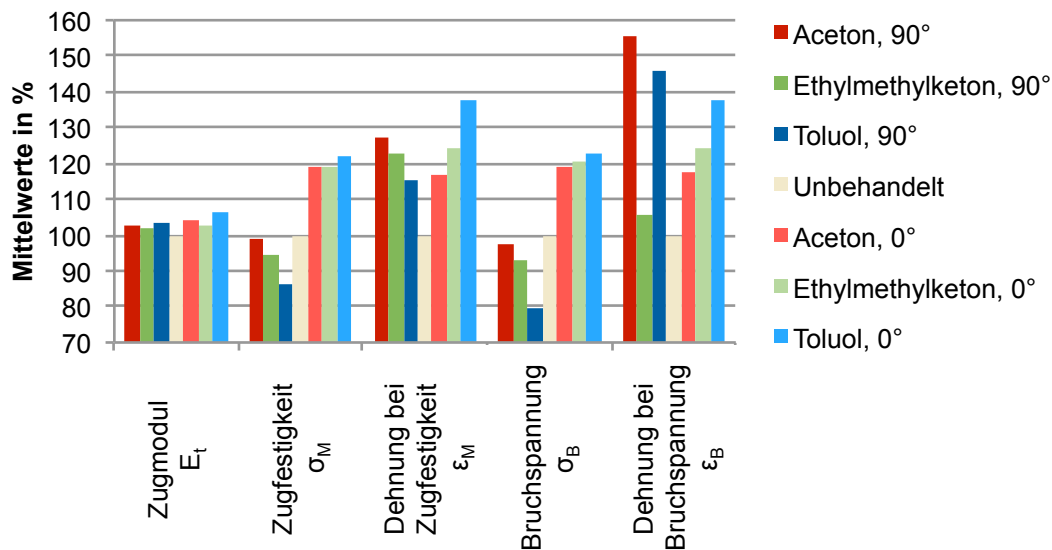


Bild 3-43: Zugprobenübersicht normiert auf unbehandelte Proben

Bezogen auf den unbehandelten Zustand (100 %) ändert sich das Zugmodul in beiden Orientierungen nur geringfügig. Die Spannungswerte hingegen zeigen eine konträre Wirkung auf 0° und 90° ausgerichtete Proben. Sowohl bei Bruch- als auch bei Zugfestigkeit erfolgt eine Erhöhung bei stehenden Proben, jedoch eine Reduzierung bei liegenden. Die Tendenzen zwischen den Wirkmedien sind dabei sehr ähnlich. Bezüglich der Dehnung zeigen alle behandelten Proben eine Erhöhung im Vergleich zu den jeweils unbehandelten Ergebnissen.

Für ein tieferes Verständnis folgt die Betrachtung der Absolutwerte, beginnend mit den Dehnungen in Bild 3-44. Die dargestellten Standardabweichungen zeigen eine sehr gleichbleibende Qualität der Bauteile, die auch durch die Nachbehandlung nicht wesentlich beeinträchtigt ist. Zudem ist deutlich zu sehen, dass in jedem Zustand die Dehnungswerte der liegenden Proben deutlich höher sind, als jene der stehend gebauten. Hier zeigt sich die Anisotropie des Verfahrens, die auch durch die Chemikalien nicht reduziert, eher verstärkt wird. Während bei liegenden Proben tatsächlich das Material auf Zug belastet wird, erfolgt dies bei stehenden Proben vorrangig auf die Anbindung zwischen den Schichten. Stehende Proben zeigen zudem keine Differenz zwischen Dehnung bei Zugfestigkeit und Dehnung bei Bruch. Sobald das Material, also der Zusammenhalt der Schichten einmalig nachlässt, folgt unmittelbar der Bruch durch Lösen der Verbindung. In jedem Zustand ist das Verhalten demnach als spröde zu charakterisieren.

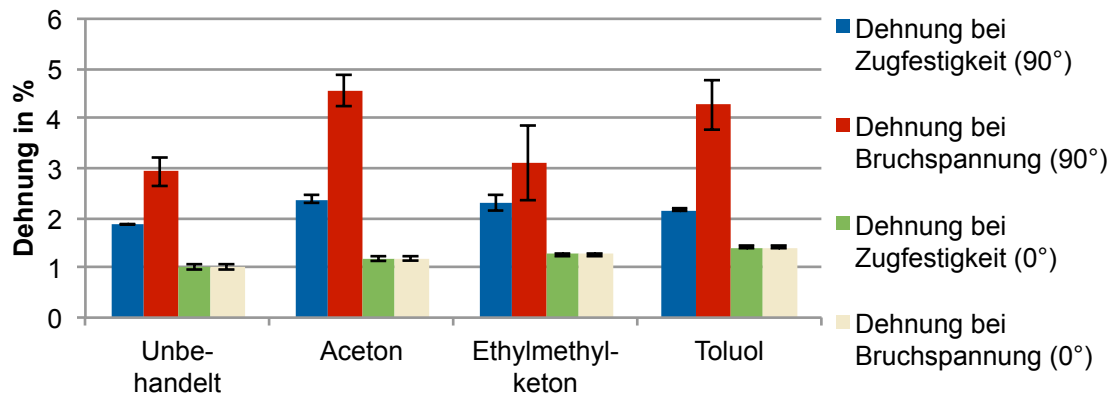


Bild 3-44: Vergleich der Dehnungswerte

Die geringe Erhöhung in nachbehandeltem Zustand ist mit der Reduzierung der Kerbwirkung durch die Verminderung der Rauheit und die Verbindung der Schichten im Randbereich zu erklären. Dadurch kann eine etwas höhere Verformung vor dem Bruch erreicht werden. Auch hier ist zu vermuten, dass das Material an senkrechten Flächen, hier also nahezu dem gesamten Probekörper, nicht durch die geschlossene Kontur eindringt. Bei liegenden Proben hingegen sind an den langen Seitenflächen Bauteilober- bzw. -unterseiten vorhanden, in die ein besseres Eindringen der Medien möglich ist. Durch die Auflockerung der Moleküle entsteht demnach eine spannungsärmere Struktur, die weniger spröde ist. Toluol erreicht dies vermutlich durch ein tieferes Eindringen aufgrund der geringeren Aggressivität in Kombination mit der langen Einwirkzeit. Die Ketone hingegen wirken eher in Randzonen, aber wesentlich aggressiver. Ein Vergleich mit Literaturwerten ist kaum möglich. Durch FLM hergestellte Bauteile sind von zu vielen Parametern abhängig. Allgemeine Angaben sind aufgrund der schicht- und strangweisen Herstellung nicht vergleichbar. Mit 2,5 bis 3 % Streckdehnung, welche für das Verhalten dieser Versuche mit der Dehnung bei Zugfestigkeit gleichzusetzen ist, [177] [178] befinden sich alle liegenden Proben geringfügig unter diesem Wert, stehende weit darunter. Die Literaturangabe der Bruchdehnung von 15 bis 20 % wird bei weitem in keinem Zustand erreicht. Für die Auslegung von Bauteilen spielt die Nachbehandlung demnach in Bezug auf die Dehnungswerte des Materials keine Rolle. Die Erhöhung ist derart gering, dass das ursprüngliche Verhalten von FLM-Bauteilen heranzuziehen ist.

Als nächstes erfolgt die Betrachtung der Spannungswerte, also der Zugfestigkeit und der Bruchspannung. Die Ergebnisse sind in Bild 3-45 dargestellt. Auch hier zeigt sich durch die geringen Standardabweichungen eine gute Reproduzierbarkeit der Bauteile. Auch die Nachbehandlung erzeugt keine größeren Qualitätsschwankungen. Der Vergleich zwischen stehenden und liegenden Proben zeigt deutliche Unterschiede in der Auswirkung der Chemikalien. Die Erklärung kann erneut in der unterschiedlichen

Möglichkeit des Eindringens gesucht werden. Die Auswirkung auf das Bauteilinnere ist bei stehenden Proben sehr gering, wodurch die Reduzierung der Kerbwirkung als wesentlicher Einfluss zu identifizieren ist. Da die Glättung von vergleichbarer Qualität ist, unterscheiden sich auch die Festigkeits- und Bruchspannungswerte der unterschiedlich nachbehandelten Proben kaum. Im Vergleich zu unbehandelten Proben ist die Zugfestigkeit im Durchschnitt um 20 % erhöht, die Bruchspannung um ca. 20,6 %. Bei liegend gebauten Proben gibt es keine bzw. kaum Kerbwirkung bei Zugbelastung. Daher sind die Werte ausschließlich auf das Verhalten der einzelnen Stränge bzw. des Materials zurückzuführen. Durch die Auflockerung der Moleküle entsteht eine Reduzierung der Festigkeit. Diese wirkt mit weiterem Eindringen in das Bauteil auf größere Teile des Bauteilquerschnitts. Demnach sorgt Toluol mit der vermutlich tiefsten Einwirkung für die stärkste Minderung. Die Ketone liegen nah zusammen, wobei Ethylmethyleketon mit der längeren Einwirkzeit geringfügig mehr Einfluss nimmt. Die Zugfestigkeit wird bei Aceton nur um 0,7 %, bei Ethylmethyleketon bereits um ca. 5 % und bei Toluol letztlich um 13,5 % reduziert, die Bruchspannung um ca. 3, 7 und 20 %. Eine homogene Materialeigenschaft ermöglicht grundsätzlich eine einfachere Auslegbarkeit von Bauteilen. Toluol sorgt für eine annähernde Homogenisierung, jedoch nicht durch ein Angleichen der niedrigeren Werte an die hohen, sondern durch das Einstellen aller Werte etwa im Mittelwert des Ausgangszustandes. Reichen diese Werte für den Anwendungsfall, kann Toluol bevorzugt werden. Die Reduzierung der Eigenschaften in 90° Orientierung der Ketone ist so gering, dass die Werte unbehandelter Bauteile anzunehmen sind. Der Vergleich mit Literaturwerten ($45 - 65 \text{ N/mm}^2$ [177]) ist auch bei der Festigkeit kaum zu ziehen. Stehende Proben werden nicht materialseitig, sondern eher an der Anbindungsstelle belastet. Bei liegenden Proben erfolgt die Belastung zwar vollständig auf das Material, der Gesamtmaterialquerschnitt ist dabei durch die Lücken zwischen den einzelnen Strängen jedoch geringer.

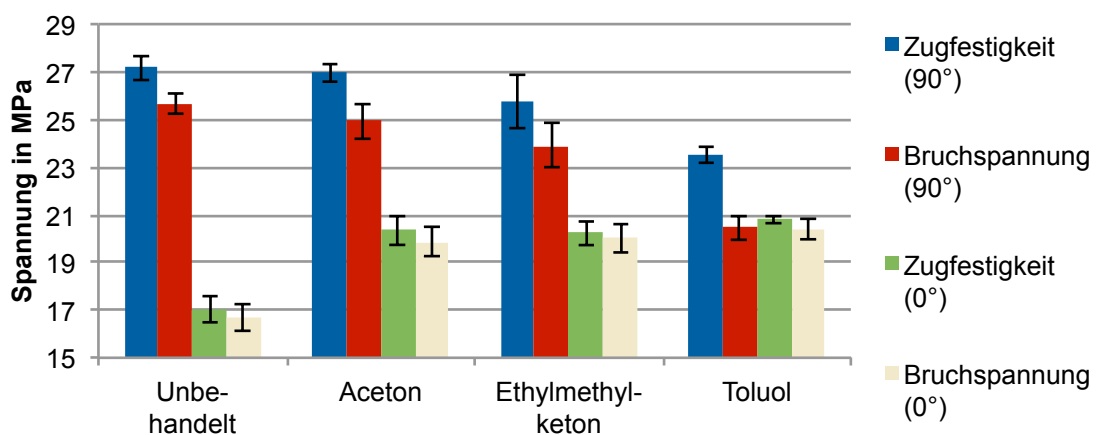


Bild 3-45: Vergleich der Spannungswerte

Abschließend soll das Zugmodul betrachtet werden. Es beschreibt die Steigung der Kurve im Dehnungsbereich zwischen 0,05 und 0,25 % [178]. Die Werte zeigt Bild 3-46.

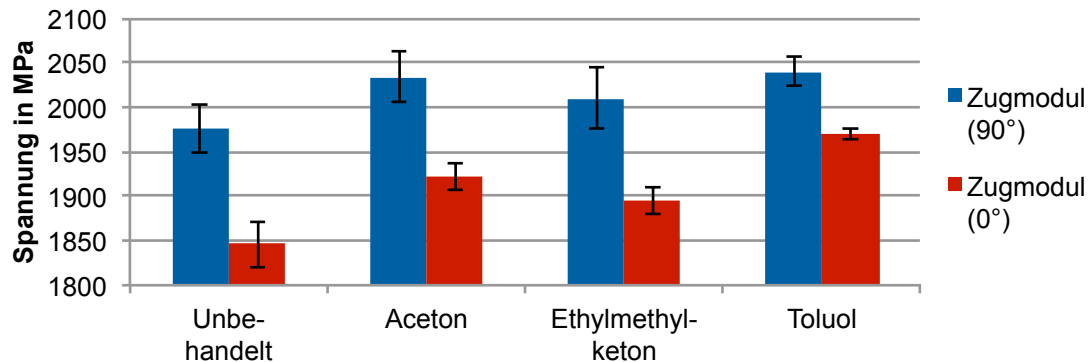


Bild 3-46: Vergleich des Zugmoduls

Es fällt auf, dass durch die chemische Nachbehandlung, unabhängig von der verwendeten Chemikalie, eine Erhöhung des Zugmoduls erreicht wird. Die dargestellten Unterschiede täuschen allerdings, da die Ordinatenachse erst bei 1800 MPa beginnt. Die Steigerung beträgt, bezogen auf die unbehandelten Bauteile, maximal 6,7 % für liegend gebaute und mit Toluol nachbehandelte Bauteile. Der Einfluss auf liegende Bauteile ist generell aufgrund der besseren Eindringmöglichkeiten höher als auf stehende Bauteile. Die Unterschiede zu unbehandelten Bauteilen sind insgesamt so gering, dass sie für eine Bauteilauslegung außer Acht gelassen werden können. Literaturwerte von 2200 – 3000 N/mm² [177] sind ohnehin verfahrensbedingt nicht zu erreichen.

Zusammenfassend sind die Auswirkungen der Nachbehandlung auf die Zugeigenschaften nur gering. Die Dehnung liegender Proben wird geringfügig erhöht, bei stehenden Proben ist der Einfluss durch die hauptsächliche Belastung der Fügestellen kaum vorhanden. Prozentual liegt die Erhöhung bei Toluol zwar bei knapp 40 %, was jedoch nur eine Erhöhung von 1 auf 1,4 % bewirkt und somit den Einsatzbereich nicht wesentlich erweitert. Bei den Spannungswerten erfolgt eine Annäherung der unterschiedlichen Orientierungen, wobei dies durch die Reduzierung liegender und die Erhöhung stehender Proben geschieht. Der Effekt ist bei Toluol am stärksten ausgeprägt. Das Zugmodul wird prozentual am geringsten beeinflusst. Positiv ist festzuhalten, dass die chemische Nachbehandlung zur Verbesserung oder maximal zu einer sehr geringen Verschlechterung der Eigenschaften führt und demnach keine zusätzliche Einschränkung erzeugt. Die Abweichungen sind insgesamt ähnlich niedrig im Vergleich zu unbehandelten Bauteilen, was zu einer hohen Reproduzierbarkeit führt.

3.6.3 Betrachtung der Eindringtiefe

An einigen Stellen erfolgt die Vermutung, dass die Eindringtiefe der unterschiedlichen Medien und Orientierungen variiert und somit zu unterschiedlichem Einfluss führt. Zum besseren Verständnis und als Hilfestellung bzw. Stütze der Erklärungen sollen REM-Bilder die Eindringtiefe der Chemikalien sichtbar machen. Dazu erfolgen Aufnahmen der Bruchstelle eines Zugstabes aus jeder Messreihe. Die aus Kostengründen nur geringe Anzahl an Aufnahmen kann toleriert werden, da die Auswertung der Zugversuche eine nur sehr geringe Streuung ergibt und somit von gleichen oder zumindest sehr ähnlichen Zuständen innerhalb der einzelnen Prüfkörper auszugehen ist. Die Übersicht der Aufnahmen in Bild 3-47 bestätigt deutliche Unterschiede der Eindringtiefe. Während bei horizontal gebauten Probekörpern ein wesentlicher Einfluss der Chemikalien auf das Innere des Bauteils zu erkennen ist, unterscheiden sich die Aufnahmen der vertikal gebauten Zugproben nicht voneinander.

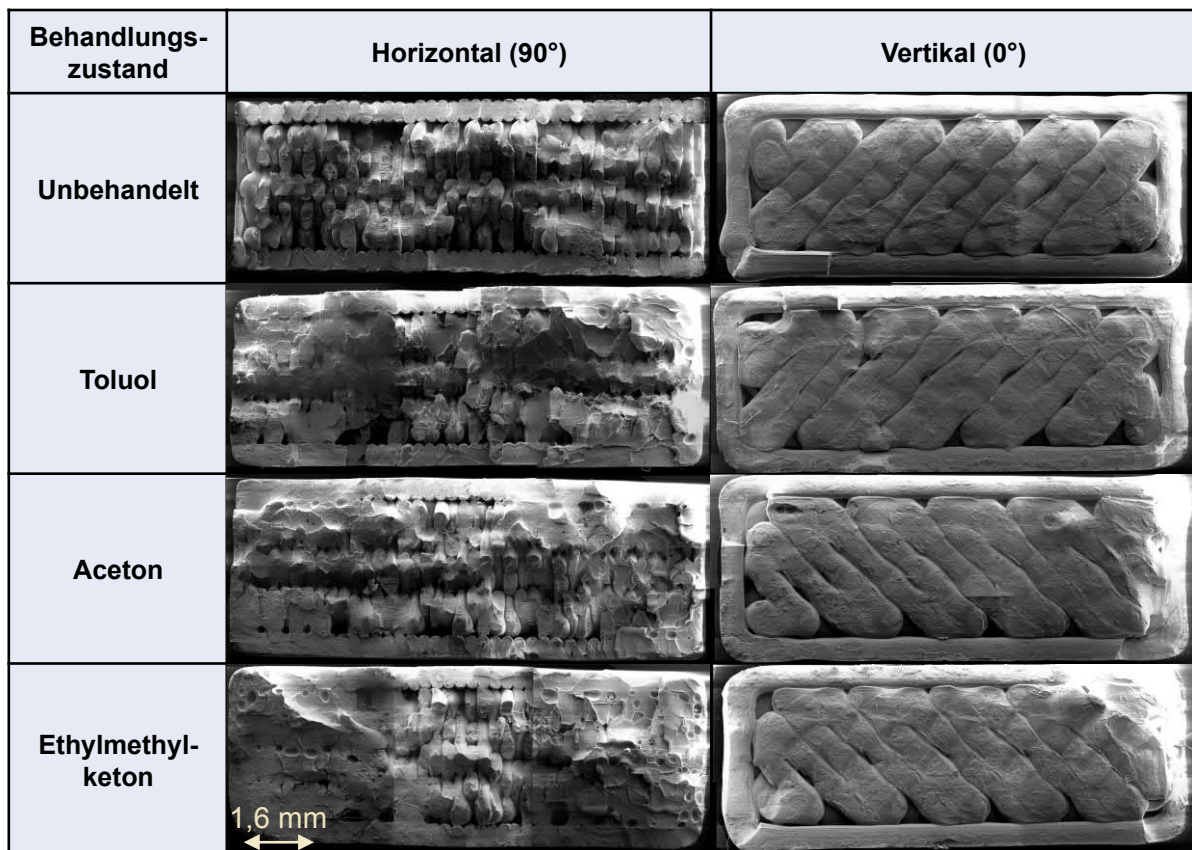


Bild 3-47: Übersicht der REM-Aufnahmen

Zunächst bestätigen die Aufnahmen also die getroffene Annahme, dass durch die geschlossene Außenkontur generell das Eindringen in senkrechte Flächen nicht möglich ist. Das Versagen der stehend gebauten Proben ist auf die Anbindungsstellen der Schichten zurückzuführen. Die Vermutung des ausschließlichen Einflusses der reduzierten Kerbwirkung und der Verbindung der Schichten im Randbereich trifft

demnach zu. Das unterschiedlich tiefe Eindringen an Bauteilober- und -unterseiten (in Bild 3-47 in der linken Spalte am rechten und linken Bauteilrand) der Chemikalien ist ebenfalls sichtbar. Bei der unbehandelten Probe ist flächendeckend deutlich die strangartige Innenstruktur zu erkennen. Bei Toluol hingegen erscheint nahezu der gesamte innere Bereich diffus. Die Ketone zeigen noch deutliche Bereiche, in denen Stränge sichtbar sind, wobei Aceton mit der kürzesten Einwirkzeit und der höchsten Aggressivität den geringsten Einfluss im Inneren ausübt. Neben der Bestätigung der bisherigen Vermutungen auf den Zusammenhang zwischen der Einwirktiefe und den entstehenden unterschiedlichen Eigenschaften, liefert die Darstellung gute Ansätze für noch folgende Untersuchungen.

3.6.4 Dichte

Die Dichte eines Materials oder Bauteils wird nach DIN 1306 als Quotient aus Masse und Feststoffvolumen unter Ausschluss von Hohlraumvolumen definiert [185]. Die Bestimmung erfolgt normkonform anhand der in DIN EN ISO 1183 Teil 1 bis Teil 3 dargestellten Verfahren [186] [187] [188]. Aus Mangel an Messapparaturen wird die beschriebene Feststoffdichte nicht herangezogen. Stattdessen wird der Quotient auf Basis von Maßen und Gewicht der verwendeten Testwürfel ermittelt. Die Dichte als absoluter Wert ist dabei von untergeordneter Wichtigkeit. Vorrangig ist die Gewichts- zu- oder -abnahme zu betrachten. Die durch das strangweise Erstellen entstehenden Hohlräume werden nicht berücksichtigt, weshalb die ermittelten Werte nicht als Materialkennwerte zu interpretieren sind. Die drei Kantenlängen werden mittig mithilfe von Bügelmessschrauben bestimmt, wobei jeweils die Mitte der Seitenflächen als Messstelle dient. Zur Gewichtsbestimmung dient die Feinwaage BT200 der Firma PCE-Group. Mit einer Ablesbarkeit von 0,001 g und einer Reproduzierbarkeit von 0,002 g ist die Genauigkeit ausreichend, um Unterschiede der Zustände auszumachen. [189] Um den Einfluss der Bauteilgröße zu berücksichtigen, erfolgt die Betrachtung an Würfeln mit einer Kantenlänge von 1 und 2 cm. Bild 3-48 zeigt zunächst die Ergebnisse bei 1 cm³. Die sehr geringen Standardabweichungen lassen auch bei dieser Versuchsreihe auf eine gute Reproduzierbarkeit schließen. Bezüglich des Gewichtes zeigen sich die auf Basis der Eindringtiefe zu erwartenden Unterschiede der Chemikalien. Toluol hat mit der tiefsten Eindringung den größten Effekt auf das Gewicht. Auch wenn die Ketone nah beieinander liegen, kann die tiefere Einwirkung von Ethylmethylketon bestätigt werden. Es ist dabei jedoch auch zu berücksichtigen, dass durch die Ketone, in erster Linie durch Aceton eine geringfügige Abtragung (Verfärbung des Lösemittels) vorgenommen wird. Das Volumen, bestimmt durch drei Kantenlängen, wird durch Toluol am geringsten beeinflusst. Die Abweichung von unbehandelten Bauteilen beträgt lediglich 0,6 %, gefolgt von 0,9 % bei Ethylmethylke-

ton und 1,24 % bei Aceton. Die Erklärungen sind analog zur Beschreibung der Maßhaltigkeit und sollen an dieser Stelle nicht erneut dargelegt werden.

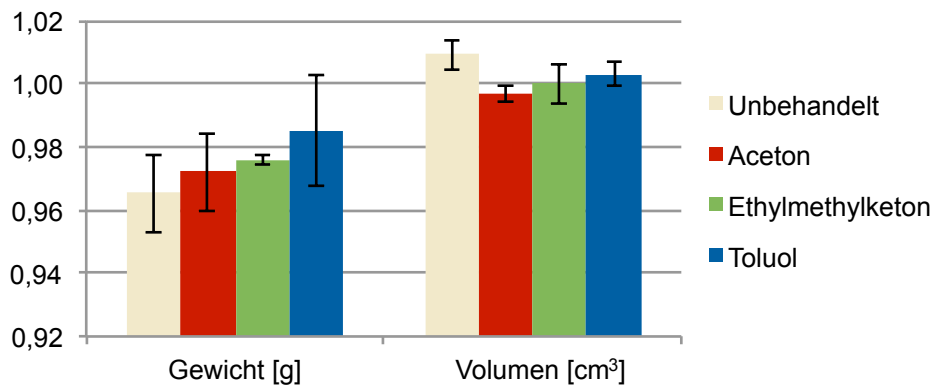


Bild 3-48: Gewicht und Volumen bei 1 cm³

Die Ergebnisse für die Versuchsreihe der Würfel mit einem theoretischen Volumen von 8 cm³ sind in Bild 3-49 zu sehen. Das Gewicht verhält sich dabei vergleichbar zu den 1 cm³ Proben. Die prozentualen Abweichungen vom unbehandelten Bauteil sind dabei mit 0,5, 1 bzw. 2 % nahezu identisch mit denen der kleineren Proben. Die Übertragbarkeit auf den realen Anwendungsfall ist nur eingeschränkt möglich, da die Gewichtszunahme vom Anteil der Ober- und Unterseiten am Gesamtbauteil abhängig sind. Bei den betrachteten Würfeln ist das Verhältnis von gut zu schlecht eindringbaren Flächen jeweils eins zu zwei.

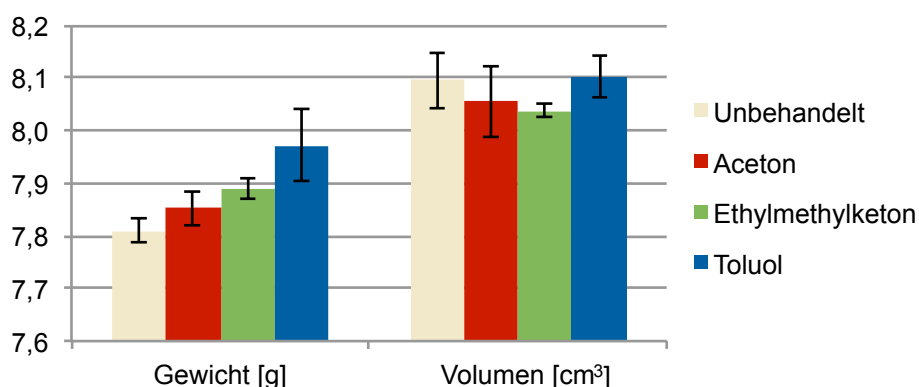


Bild 3-49: Gewicht und Volumen bei 8 cm³

Die Abweichung der Maße ist prozentual deutlich geringer. Mit einer Abnahme um 0,5 bzw. 0,7 % und nahezu identischen Maßen bei Toluol bestätigen sich auch hier die Ergebnisse der Untersuchung zur Maßhaltigkeit. So sind die ohnehin schon sehr geringen Abweichungen mit zunehmender Bauteilgröße vernachlässigbar.

Für die Dichte bzw. die für den hier betrachteten Fall als ausreichend genau gewerten Quotienten aus Abmaßen und Gewicht, ergibt sich demnach das in Bild 3-50 dargestellte Verhältnis. Wenn auch die Veränderungen der äußeren Gestalt bei der Anwendung von Toluol am geringsten sind, so ändert sich die Dichte durch die deutlichste Gewichtszunahme am meisten. Dieser Zusammenhang ist für beide Testkörper gültig. Dabei sinkt der prozentuale Unterschied von unbehandelten zu nachbehandelten Bauteilen mit der Bauteilgröße. Während der Unterschied bei den kleinen Würfeln noch ca. 2 % bei den Ketonen und 2,7 % bei Toluol beträgt, liegt er bei den größeren Würfeln nur noch bei 1, 1,7 bzw. 2 %. Dass die Dichte generell mit zunehmender Größe steigt, wird am inneren Aufbau der Bauteile liegen. Literaturwerte von $1,03 - 1,07 \text{ g/cm}^3$ [177] können durch den strangartigen Aufbau nicht erreicht werden. Bei normgerechter Prüfung würden die Werte der hier betrachteten Probekörper oberhalb der dargestellten Werte liegen, da dabei die innenliegenden Hohlräume vom Volumen subtrahiert würden. Es bleibt dabei allerdings fraglich, ob die Messung zu exakten Ergebnissen führen würde, da die Bauteilstruktur in den äußeren Bereichen durch die Nachbehandlung deutlich dichter ist als unbehandelt und somit ein Eindringen der Prüfflüssigkeit nicht gewährleistet ist.

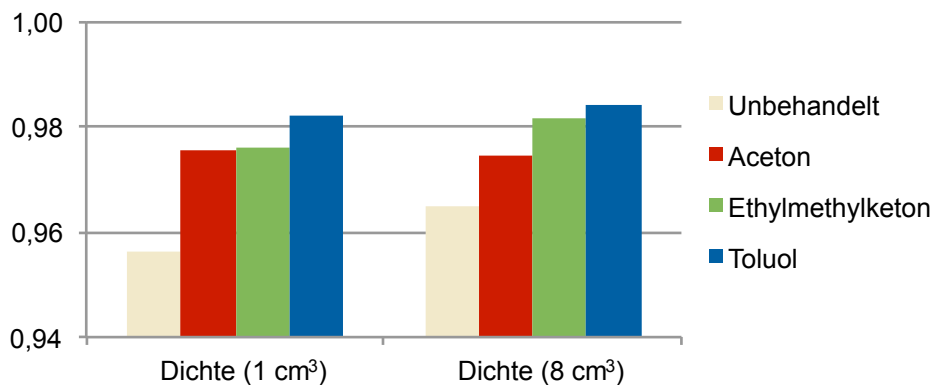


Bild 3-50: Dichte bei 1 und 8 cm³

Insgesamt ist zur Betrachtung der Dichte eine so geringe Beeinflussung durch die Nachbehandlung festzuhalten, dass die Verbesserung der Oberfläche weder in positiver noch in negativer Weise beeinflusst wird. Änderungen von maximal 2,7 % sind für die Auslegung von Bauteilen vernachlässigbar. Zudem ist dem Nutzer des Verfahrens bewusst, dass Literaturwerte nicht erreichbar sind und demnach auch nicht damit zu kalkulieren ist. Interessanter als die Dichte scheint zur Erhöhung der Einsatzmöglichkeiten letztlich die Dichtigkeit der Bauteile, die womöglich durch die vorrangig im Randbereich wirkende Nachbehandlung gesteigert werden kann. Somit erfolgt als letzte Betrachtung die im Folgenden dargestellte Untersuchung zur Gasdichtigkeit.

3.6.5 Gasdichtheit

Durch die strangartige Bauweise sind FLM-Bauteile ohne eine entsprechende Nachbehandlung gegenüber Fluiden nicht undurchlässig. Zur Abdichtung existieren unterschiedliche, im Grundlagenteil beschriebene Ansätze. Untersucht wird die Dichtheit gegenüber Luft oder Wasser, drucklos oder unter geringem Druck. [17] [23] [24] DIN 1330-8 definiert dicht als einen Zustand frei von Lecks entsprechend einer gegebenen Spezifikation, wobei das Leck ein Loch, ein poröser Bereich oder ein gasdurchlässiger Bereich sein kann. [190] Demnach gibt es im technischen Sinne keine absolute Dichtheit. Alle Materialien haben Spalte und Öffnungen, wenn auch nur im atomaren Bereich. [191] Im Folgenden soll in Anlehnung an DIN EN 1779 mithilfe des Helium Leckdetektors Phoenixl 300 der Firma Oerlikon Leybold Vacuum zunächst ein Vakuum aufgebaut und anschließend die Leckagerate mit Helium geprüft werden. So ist die Gasleckagerate zu bestimmen, die Aufschluss über die Dichtheit eines Objektes gibt. Da bei Helium in Kombination mit Polymeren eine starke Permeation zu erwarten ist, erfolgt die Messung unmittelbar nach Anlegen des Heliumstroms. Aufgrund der fehlenden Kenntnis über die Prüfgaskonzentration des Raumes kann nur eine qualitative Einschätzung durchgeführt werden. [192] Bild 3-51 zeigt die verwendete Messapparatur.

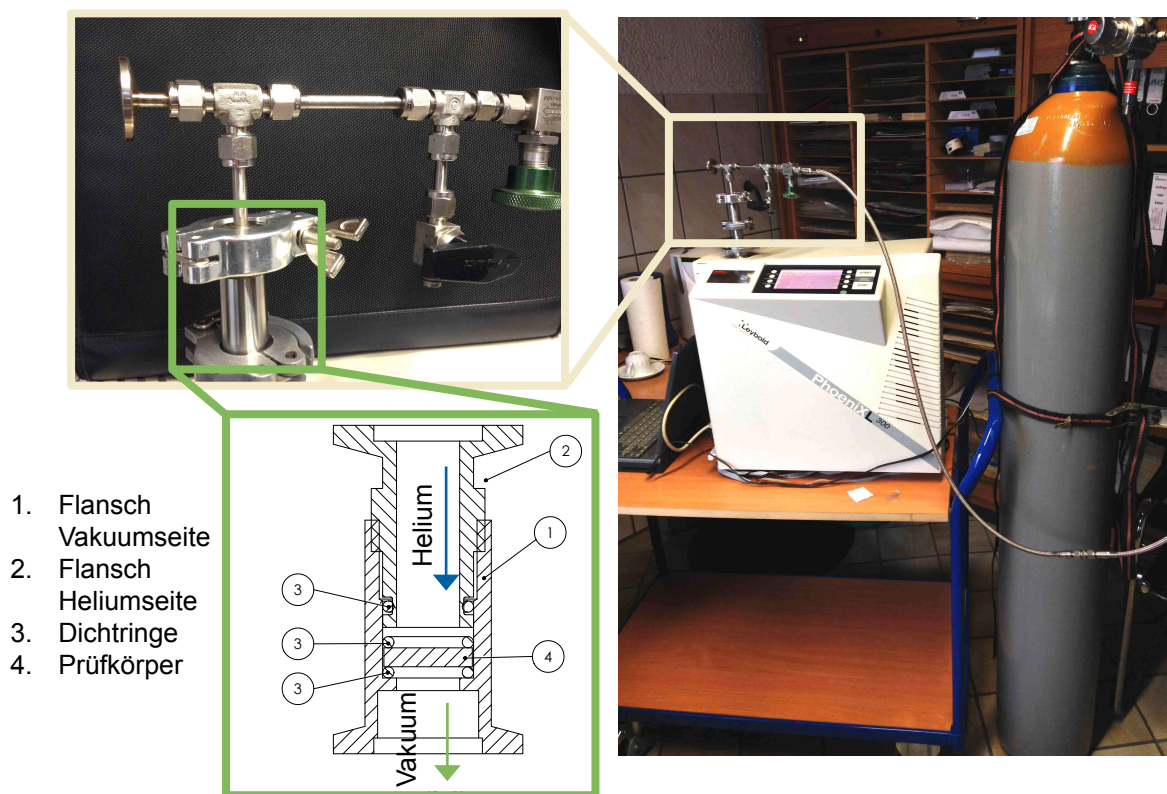


Bild 3-51: Vorrichtung zur Bestimmung der Gasdichtheit

Die Darstellung bildet das Messgerät sowie den notwendigen Heliumvorrat mit Verbindung zur Anschlussapparatur ab. In der Detailzeichnung ist eine für den Versuch erstellte Vorrichtung zu sehen, die das Einspannen der Prüfkörper ermöglicht. Durch die zwei verschraubbaren Segmente (Nr. 1 und 2) kann ein scheibenförmiger Prüfkörper (Nr. 4) unter Zuhilfenahme von einem oberen und unteren Dichtring (Nr. 3) verspannt werden. Die Anschlüsse sind angelehnt an Kleinflansch-Verbindungen der Vakuumtechnik nach DIN 28403 und ermöglichen den verlustfreien Anschluss. [193] Die Probekörper haben einen Durchmesser von 14 mm und eine Dicke von 1 bzw. 2 mm. Für jede Dicke und jeden Zustand, also unbehandelt und mit den drei verwendeten Chemikalien geglättet, liegen je drei vertikal und drei horizontal gebaute Probekörper vor.

Bereits die Erzeugung des Vakuums zeigt deutliche Unterschiede der unbehandelten und nachbehandelten Bauteile. Bei unbehandelten Bauteilen kann im besten Fall ein Vakuum von 0,5 mbar erreicht werden. Durchschnittlich beträgt der Wert für beide Dicken und Orientierungen 2 mbar. Die 1 und 2 mm dicken Proben unterscheiden sich dabei kaum. Mit durchschnittlich 1,4 mbar ermöglichen die vertikal gebauten Proben den Aufbau eines etwas stärkeren Vakuums als die horizontal gebauten Proben mit 2,65 mbar. Zurückzuführen ist dieser Umstand auf die bereits beschriebene offenere Struktur der 90° orientierten Flächen. Insgesamt ermöglichen unbehandelte Flächen bei Wandstärken bis 2 mm demnach maximal einen Einsatz im Grobvakuumbereich [194]. Die nachbehandelten Proben unterscheiden sich weder bezüglich der Dicke noch im Hinblick auf die Orientierung oder die verwendete Chemikalie. Im Durchschnitt kann ein Vakuum von $5,7 \cdot 10^{-3}$ mbar und somit der Druck um den Faktor 350 reduziert werden. Dabei ist der kleinste erreichte Wert der nachbehandelten Proben $4,6 \cdot 10^{-3}$ und der größte $6,3 \cdot 10^{-3}$ mbar. Die Streuung ist also minimal. Durch die enorme Steigerung der Vakuumfähigkeit sind neue Anwendungsmöglichkeiten denkbar. Der Bereich um 10^{-3} mbar befindet sich genau an der Grenze vom Fein- zum Hochvakuum [194].

Nach dem Erreichen des jeweils maximalen Vakuums erfolgt durch das Öffnen des Heliumventils eine drucklose Anströmung mit dem Prüfgas. Durch die fehlende Kenntnis über die Messraumkonzentration kann hier nur eine grobe Einstufung erfolgen. Wieder ist ein deutlicher Unterschied zwischen unbehandelten und nachbehandelten Proben ersichtlich. Unbehandelte Proben liegen im Bereich von 10^0 bis maximal 10^{-2} mbar·l/s, wobei letzterer Wert nur auf eine Probe zutrifft. Die nachbehandelten Proben unterscheiden sich untereinander in ihren Tendenzen kaum und zeigen Werte um 10^{-8} mbar·l/s. Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse kann den Leckageraten ein ungefährer Durchmesser des Lecks und eine Leckagebeschreibung zugeordnet werden, die sich auf das Verhalten in einer Wasserdruck- oder Wasser-

badprüfung bei einem bar Druckdifferenz bezieht. Der Bereich um 10^0 ist mit einem Leck von 0,1 mm Durchmesser und einem tropfenden Wasserhahn zu vergleichen. Ab 10^{-2} mbar*l/s kann mit einem Leck von 0,03 mm von gerade wasserdicht gesprochen werden. Eine Leckagerate von 10^{-8} mbar*l/s entspricht nur noch einem Leck von 0,4 μ m bei 2 mm Wandstärke und einem Gasverlust von 3 cm³ in einem Jahr. Der Unterschied ist demnach enorm. [191] Zur Überprüfung auf die Dichtheit unter Druck erfolgt exemplarisch an einigen Proben das Beaufschlagen mit Helium unter einem Druck von 4 bar. Auch unter dieser Belastung blieb die Leckagerate bei 10^{-7} mbar*l/s. Die Messungen zeigen deutlich das Potential der nachbehandelten Bauteile im Bezug auf ihren Gebrauch in medienförderndem oder -dichtendem Einsatz. Eindeutig ist, dass die Dichtheit nur von den Randbereichen abhängt. Zwischen den unterschiedlichen Dicken zeigen sich keine Unterschiede. Auch die Orientierung wirkt sich nicht auf die Dichtheit nachbehandelter Bauteile aus, da die Fehlstellen des FLM überall geschlossen sind. Durch die ähnliche Glättungswirkung der unterschiedlich aggressiven Medien, die durch die angepassten Einwirkzeiten zu erreichen sind, zeigen auch die unterschiedlichen Chemikalien keine Abweichungen der Ergebnisse. Detailliertere und an den Anwendungsfall angepasste Prüfungen sind für die Auslegung dennoch unerlässlich.

3.7 Fazit der chemischen Bauteilnachbehandlung

Nach dem Herausstellen von möglichen Chemikalien zur Nachbehandlung von FLM-Bauteilen, der folgenden Einschränkung durch erste Versuche und detaillierteren Betrachtungen verschiedener Eigenschaften kann festgehalten werden, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Medien relativ gering sind. Durch die notwendige Anpassung der Einwirkzeit kann die fehlende Aggressivität einiger Medien ausgeglichen werden. Interessant für den Privatbereich ist sicherlich das gängige und öffentlich zu erwerbende Aceton. Durch die schnelle Behandlung können sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Für weitere Untersuchungen können länger wirkende Medien interessant sein, da gezielte Veränderungen möglich sein könnten. Dazu bedarf es weiterer Versuche, die die Zeitkomponente näher betrachten. Potential in der weiteren Entwicklung liegt auch in der Anwendung der Nachbehandlung. Entsprechende Apparaturen, standardisierte Haltevorrichtungen, die an den jeweiligen Bauteilen notwendig sind und eine mögliche Rotation bzw. Bewegung des Bauteils oder aber des Fluids zur Vermeidung von Vorzugsrichtungen sind nur einige der denkbaren Entwicklungen, um die hier erzielten Ergebnisse gewinnbringend einsetzen zu können.

4 FLM-Kerne zur galvanischen Abscheidung

Nach der Untersuchung der Auswirkungen auf die Eigenschaften von FLM-Bauteilen durch die chemische Nachbehandlung erfolgt in diesem Teil der Arbeit die Betrachtung eines möglichen Einsatzgebietes solcher Bauteile. Dazu wird die Galvanik als Folgeverfahren in einer Verfahrenskombination herangezogen. Bisher ist diese Technologie in Verbindung mit den additiven Fertigungsverfahren zur Beschichtung von Bauteilen bekannt [124]. Vorrangig kommen dabei lasergesinterte und stereolithographische, jedoch auch FLM-Modelle zum Einsatz. [195] [196] [197] [198] In jedem Fall erfolgt durch die Anwendung der Galvanik eine Veredelung der additiven Erzeugnisse. Der folgende Ansatz grenzt sich davon ab und bezieht sich nicht auf die galvanische Beschichtung, sondern vielmehr auf die Galvanoformung, bei der die Beschichtung letztlich zum Bauteil wird. Demnach dient das additiv hergestellte Modell nur als Transfermodell, wie es in Bild 4-1 anhand der Prozesskette indirekter Prozesse nach VDI Richtlinie 3404 dargestellt ist.

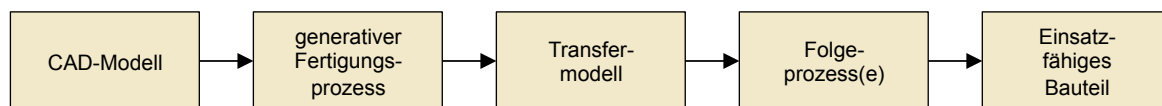


Bild 4-1: Prozesskette indirekter Prozesse nach VDI 3404 [7]

Das FLM ist demnach der additive Fertigungsprozess (hier generativ bezeichnet) und das Bauteil das Transfermodell, welches durch den Folgeprozess, die Galvanoformung weiterverarbeitet wird. Zum Herauslösen des FLM-Bauteils soll nicht der aus dem Guss übliche Ansatz des Ausbrennens dienen. Dieser ist mit Temperaturen von über 550 °C zur Vermeidung von Restasche verbunden, bei denen es zu einem Ausdehnen des Materials sowie zu starker Beeinflussung des abgeschiedenen Kupfers kommen kann. [77] [199] Stattdessen soll die in dieser Arbeit ausgiebig betrachtete Eigenschaft der Unbeständigkeit von ABS gegenüber Lösemitteln erneut genutzt werden. Durch eine fortwährende Einwirkung des Lösemittels kommt es nach der Quellung und Einhüllung der Moleküle letztlich zur endgültigen Auflösung des Zusammenhaltes. [58] Aufgrund der geringen Kosten und der stärksten Aggressivität, gemessen an der kurzen Einwirkzeit zur Glättung der Oberfläche, wird Aceton für die Versuche verwendet. Um die Möglichkeiten der Beeinflussung des Auflösenvorganges aufzuzeigen, erfolgen unterschiedliche Betrachtungen. Neben der Steigerung von Fluidtemperatur und -bewegung werden Unterschiede zwischen den am Markt erhältlichen ABS-Farben und unbehandeltem bzw. nachbehandeltem Ausgangszustand berücksichtigt. Bei allen Versuchen erfolgt auch die Betrachtung der Sättigung, also einer mehrmaligen Auflösung in einer Lösemittelmenge.

4.1 Auflösen des ABS Werkstoffes

Um die generelle, vollständige Auflösbarkeit von FLM-Modellen in Aceton zu überprüfen, erfolgt zunächst ein statischer Versuch bei Raumtemperatur. Eingesetzt werden Würfel in der Farbe Elfenbein mit einer Kantenlänge von 1 cm in 100 ml Aceton. Bild 4-2 zeigt die Zustände nach 30 Minuten bzw. 5 Stunden.

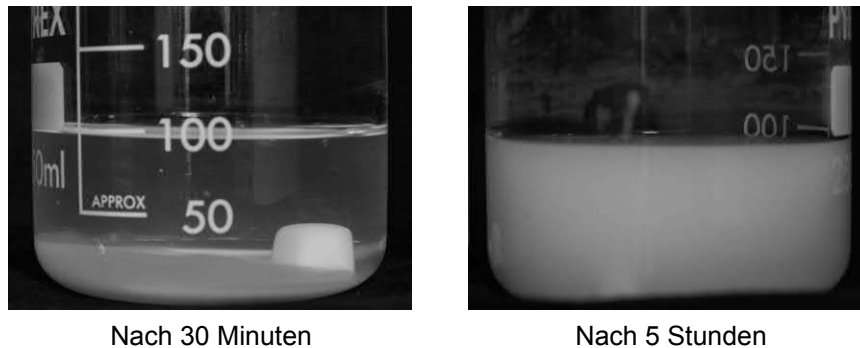


Bild 4-2: Statische Auflöserversuche

Nach 30 Minuten ist bereits ein kleiner Teil des ABS durch die Ablösung einzelner Moleküle in Lösung gegangen und befindet sich nun als sogenannter Bodensatz in Lösung [200]. Nach 5 Stunden ist bereits eine deutliche Eintrübung des Acetons zu erkennen, was auf eine Verteilung der Polymerelemente im Aceton schließen lässt. Trotz der langen Wirkzeit ist ein Rest des Würfels zu sehen. Zur Quantifizierung der Reaktion zeigt Tabelle 4-1 das Gewicht des noch nicht in Lösung gegangenen ABS nach der angegebenen Zeit.

Tabelle 4-1: Ergebnisse der statischen Auflöserversuche

Zeit [h]	0	1	2	3	4	5
Gewicht des ABS in g	1	0,65	0,43	0,38	0,3	0,27

Die Reduzierung des Gewichtes innerhalb einer Stunde sinkt stetig. Durch das Anlegen einer Näherungsfunktion kann das Verhalten mit einer Logarithmusfunktion beschrieben werden, bei der die Steigung der Kurve ebenfalls kontinuierlich sinkt. Grund für ein solches Verhalten liegt in der Menge der vorliegenden Ausgangskonzentrationen. Zu Beginn der Reaktion befindet sich das ABS in reinem Aceton. Während es langsam in Lösung geht, findet keine Durchmischung statt, wodurch ein Bodensatz entsteht und die vorliegende lokale Konzentration des Aceton sinkt. [201] Mit diesem Verhalten ist keine zufriedenstellende und wirtschaftliche Arbeitsweise möglich. Im Folgenden ist zu klären, inwiefern eine Beschleunigung mit möglichst einfachen Mitteln möglich ist.

4.1.1 Einfluss von Bewegung und Temperatur

Die aus dem Versuch der statischen Auflösung naheliegende Schlussfolgerung zur Beschleunigung der Auflösung ist die Erzeugung von Bewegung zur Vermischung des in Lösung gegangenen ABS im gesamten Gefäß. Dadurch wird die Konzentration des ABS in der Lösung homogen gehalten und eine Verarmung an reaktionsfähigem Aceton am Bauteil verhindert. Zudem führt bei Kunststoffen eine Temperaturerhöhung in der Regel zur Herabsetzung der chemischen Beständigkeit [137]. Die Molekülbeweglichkeit wird deutlich erhöht, wodurch die Anzahl und Größe der Leerstellen ebenfalls steigt. [154] [177] Das Verhalten begünstigt die Solvation von Chemikalien und beschleunigt somit das Auflösen. Beide Einflussfaktoren können mit dem in Bild 4-3 dargestellten Magnetrührer der Firma IKA auf das System ausgeübt werden.



Bild 4-3: Magnetrührer RH basic 2 der Firma IKA [202]

Durch die Edelstahlheizplatte ist theoretisch eine Temperatur von 320 °C zu erreichen. Der Drehzahlbereich des Magnetrührers hat ein Maximum von 2000 Umdrehungen pro Minute. Beide Eigenschaften sind stufenlos einstellbar. [203] Bild 4-4 zeigt eine Geschwindigkeit von ca. 1000 Umdrehungen pro Minute und einen in einem Drahtgeflecht fixierten Probekörper.



Bild 4-4: Versuch zum Bewegungseinfluss

Die beiden Einflüsse werden getrennt voneinander betrachtet. Zunächst liegt der Fokus auf der Rotationsgeschwindigkeit. Im Anschluss erfolgt die Temperaturerhöhung. Die Rotation wird dabei jedoch beibehalten, um letztlich die bestmöglichen Einstellungen zu erhalten. Zur statistischen Absicherung werden bei jeder Einstellung drei Versuchsreihen mit jeweils frischem Aceton durchgeführt. Um das Sättigungsverhalten zu berücksichtigen, erfolgt die sukzessive Auflösung von 5 Würfeln pro Versuchsreihe. Bild 4-5 zeigt die Ergebnisse bei Raumtemperatur und ca. 1000 bzw. 2000 Umdrehungen pro Minute.

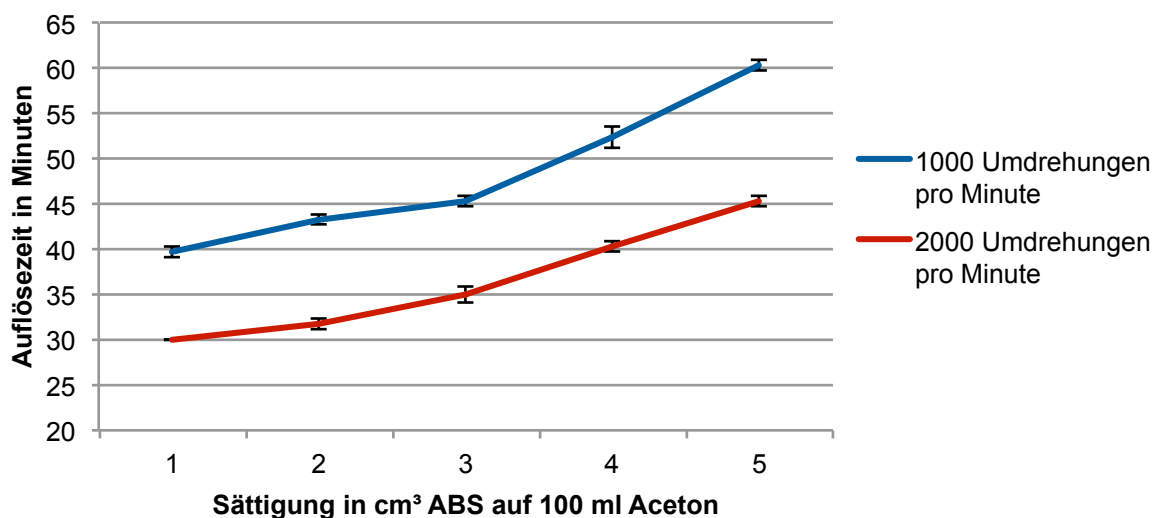


Bild 4-5: Einfluss der Bewegung des Lösemittels

Die nur minimalen Abweichungen zeigen die Reproduzierbarkeit des Versuches. Deutlich ist schon bei einer Geschwindigkeit von 1000 Umdrehungen die erhebliche Steigerung der Auflösengeschwindigkeit festzustellen. Nach bereits 40 Minuten ist der erste cm³ ABS gelöst. Im statischen Zustand ist nach 60 Minuten erst weniger als die Hälfte des ABS gelöst. Auch mit zunehmender Sättigung der Lösung bleibt die Reaktion wesentlich schneller. Die Verlangsamung steigt dabei mit der Sättigung. Die Steigung der Kurve wird also steiler. Für 2000 Umdrehungen pro Minute zeigt sich ein vergleichbares Verhalten. Die Zeit für den ersten Würfel ist um 25 % reduziert. Das Verhältnis bleibt für die weiteren Zeiten ähnlich. Neben der besseren Versorgung der ABS-Oberfläche mit frischem Aceton bzw. der Verhinderung der Verarmung, spielt vor allem der Begriff der tribologischen Beanspruchung eine wesentliche Rolle. Damit werden Beanspruchungen einer Oberfläche eines Festkörpers durch Relativbewegungen eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers beschrieben. In diesem besonderen Fall kann von einer tribochemischen Reaktion ausgegangen werden. Insbesondere die Flüssigkeitserosion oder Erosionskorrosion sind hier als Vergleich heranzuziehen. [204] Entstehende Reibung sorgt für einen Temperaturanstieg und begünstigt somit das Lösen der Moleküle. Zudem werden durch die

Reibung Moleküle herausgelöst, die ohne mechanische Beanspruchung durch eine noch ausreichende Bindungsenergie lediglich zur Quellung führen würden. Mathematisch sind die dargestellten Kurven annähernd durch Exponentialfunktionen mit einem Wachstumsfaktor von 1,11 zu beschreiben. Lediglich die Anfangswerte unterscheiden sich. Mit jedem cm^3 steigt demnach die Auflösezeit um 11 %.

Zur weiteren Erhöhung der Auflösegeschwindigkeit folgt nun die Temperaturerhöhung. Dabei ist darauf zu achten, dass die Siedetemperatur von 56°C [150] nicht erreicht wird. Die Überprüfung erfolgt durch eine kontinuierliche Überwachung. Die positive Wirkung der 2000 Umdrehungen pro Minute fließt in den Versuch ein. Bild 4-6 zeigt die Ergebnisse, wobei die Werte zur Raumtemperatur aus dem vorangegangenen Versuch übertragen sind.

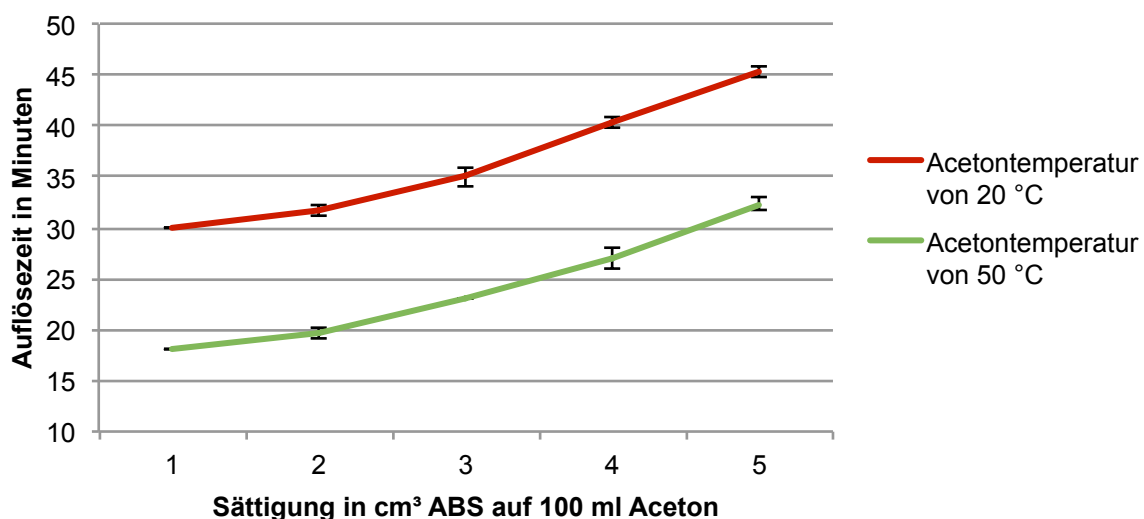


Bild 4-6: Einfluss der Acetontemperatur

Auch für die erhöhte Temperatur zeigt sich eine sehr geringe Standardabweichung und somit gute Reproduzierbarkeit. Der Verlauf zeigt sich als Verschiebung der Kurve bei Raumtemperatur. Mit einem Wachstumsfaktor von ca. 1,15 ist wieder deutlich ein Sättigungsverhalten zu sehen. Insgesamt kann allerdings durch die Temperaturerhöhung eine Reduzierung um zu Beginn etwa 40 % erfolgen. Die nach Van't Hoff theoretisch mögliche Verdoppelung bis Verdreifachung der Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Erhöhung der Temperatur um 10°C kann bei weitem nicht erreicht werden. [58] Dieser theoretische Wert ist von zu vielen Einflüssen in diesem Anwendungsfall überlagert. Wesentlich ist, dass die Erhöhung der Temperatur zu einer Zunahme der Bewegung der Teilchen eines Festkörpers führt. Die zwischenmolekularen Kräfte sind dadurch zunehmend geringer und können wesentlich leichter durch die Wirkung des Acetons gelockert bzw. aufgehoben werden.

4.1.2 Einfluss des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses

Die Auflösung des ABS ist ein oberflächennaher Prozess. Demnach ist davon auszugehen, dass das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen eine entscheidende Rolle bei der Auflösengeschwindigkeit in Anspruch nimmt. Um dies zu überprüfen, erfolgt die Bestimmung der Auflöszeit für einen Körper gleichen Volumens, jedoch mit einer größeren Oberfläche als der Würfel. Eine Möglichkeit ist ein kurzer Hohlzylinder. Mit einem Außendurchmesser von 5,5 mm und einem inneren von 2,5 mm ergibt sich bei einer Höhe von 13 mm ein Volumen von ca. 1 cm^3 . Die Oberfläche weicht mit $7,7 \text{ cm}^2$ dabei um ca. 28 % ab. Die Ergebnisse von fünf aufeinander folgend aufgelösten Hohlzylindern sind in Bild 4-7 im Vergleich zu Würfeln unter gleichen Bedingungen dargestellt.

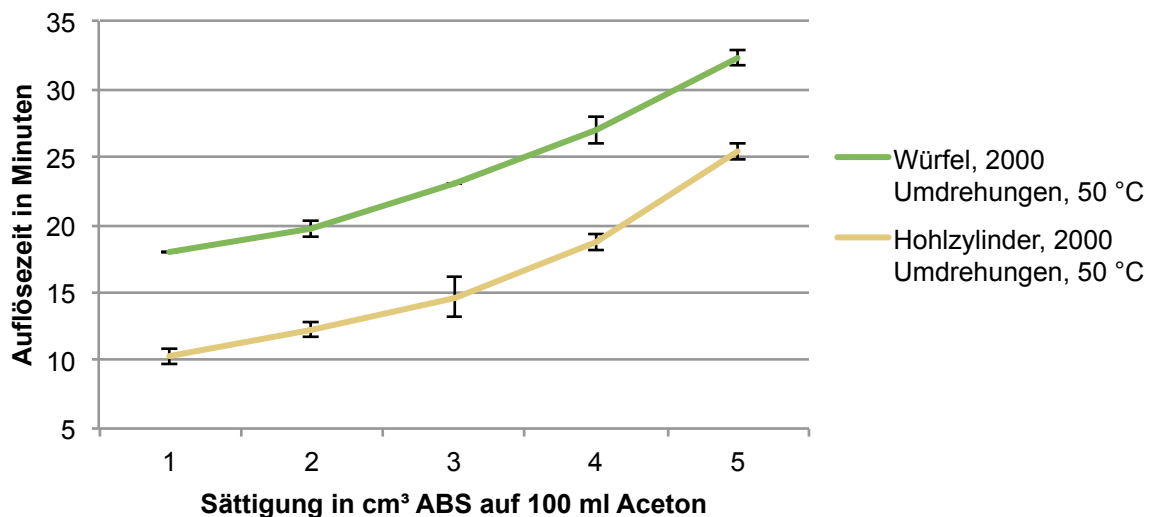


Bild 4-7: Einfluss des A/V-Verhältnisses

Die geringe Standardabweichung zeigt auch hier die gute Reproduzierbarkeit. Die Kurve verläuft ähnlich zu den vorangegangenen Versuchen und zeigt ein vergleichbares Sättigungsverhalten. Die Auflösungszeit des jeweils ersten Testkörpers ist um etwa 44 % reduziert. Dies zeigt den wesentlichen Einfluss der Oberflächengröße. Neben der formbedingt größeren Angriffsfläche herrscht eine Überlagerung mit einem weiteren auflösungsbegünstigendem Aspekt vor. Durch die Geometrie liegen nahezu alle Flächen des Hohlkörpers in einem günstigen Winkel zur Strömung. Immerhin ein Sechstel des Würfels, also die strömungsabgewandte Seite wird nicht direkt angeströmt. Für diese Fläche ist tendenziell mit einer Verarmung an frischem Aceton zu rechnen. Trotzdem zeigen die Resultate deutlich den vermuteten Zusammenhang, was für eine Auslegung im Anwendungsfall eine entscheidende Hilfe darstellt.

Um die Zeit des AuflöSENS weiter zu reduzieren, wird die Möglichkeit der Zugabe von abrasiven Mitteln in Betracht gezogen. Schon erste Versuche zeigen jedoch deutlich, dass weder mit feinkörnigem Sand noch mit kleinen Gleitschleifmitteln Erfolge zu erzielen sind. Durch die sofortige Wirkung des Acetons erfolgt eine unmittelbare Erweichung des ABS durch die Vergrößerung der Molekülabstände. Das dann auf die Oberflächen strömende Material setzt sich sofort in dieser fest und verhindert somit die endgültige Ablösung der Moleküle durch eine Art Schutzschicht. Von der Zugabe solcher Mittel ist demnach abzuraten.

Durch die durchgeführten Maßnahmen kann die Auflösezeit insgesamt deutlich reduziert werden. Ohne das statische Auflösen zu berücksichtigen, sind am Testkörper durch die Erhöhung der Bewegung und der Temperatur Zeitersparnisse von 55 % bei frischem Aceton zu erreichen. Die Sättigung verhält sich dabei unabhängig von den Parametern und führt zu der Notwendigkeit des Austauschs des Acetons bei Erreichen von unwirtschaftlichen Zyklen. Bild 4-8 zeigt zusammenfassend die durchgeführten Versuchsreihen.

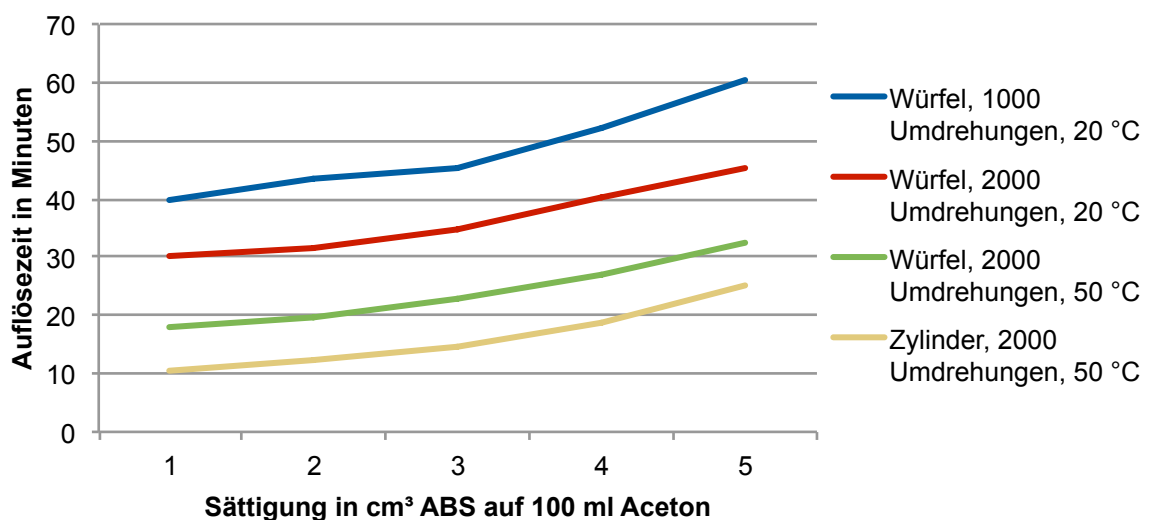


Bild 4-8: Zusammenfassung der Einflussfaktoren

Die Betrachtung der Geometrie zeigt, dass auch durch konstruktive Anpassungen deutliche Ersparnisse möglich sind. Neben einem möglichst geringen Volumen (geringe Wandstärken) und einer großen Angriffsfläche ist dabei wichtig, dass grundsätzlich für mindestens einen Ein- und einen Auslauf gesorgt ist. Die Erfahrung zeigt, dass es bei mangelnder Durchströmbarkeit nicht zur Auflösung kommt, da kein Aceton nachgeliefert und keine Moleküle abtransportiert werden können. Die entstehende stark viskose Masse lässt sich dann nur schlecht entfernen.

4.1.3 Einfluss von Farbstoffen auf die Auflösengeschwindigkeit

Zusatzstoffe wie beispielsweise Weichmacher, Füllstoffe oder auch Farbmittel können unmittelbaren Einfluss auf die Beständigkeit von Kunststoffen haben [137]. Die theoretische Bestimmung der Chemikalienbeständigkeit von Pigmenten und Farbeinstellungen ist dabei selten möglich. Während Pigmente beispielsweise beständig gegenüber einzelnen Chemikalien sein können, kann eine Kombination von beständigen Pigmenten zu einer Unbeständigkeit führen. Daher ist der Versuch unumgänglich. [58] Bisher wurde die Möglichkeit des Einsatzes unterschiedlicher Farben im FLM-Prozess nicht betrachtet. Der Versuchsumfang für eine gänzliche Betrachtung aller zur Verfügung stehenden Materialien hinsichtlich der Bauteiloptimierung wäre in diesem Rahmen nicht vertretbar. Für den Einsatz in der Galvanoformung wird jedoch untersucht, ob ein unterschiedliches Auflöseverhalten aufgrund der verwendeten Farbmittel vorhanden ist. Stratasys bietet für die Dimension Reihe sowie für das Fortus System und uPrint seplus das Material ABSplus in neun verschiedenen Farben an. Somit ist die Fragestellung für Galvanikbetriebe mit Interesse an der Verfahrenskombination in den meisten zur Verfügung stehenden Preisklassen von Bedeutung. Erhältlich sind die Farben Gelb, Orange, Elfenbein, Weiß, Rot, Grün, Blau, Grau und Schwarz. [52] [205] [206]

Bild 4-9 zeigt exemplarisch den Hergang des Auflösens bei den Farbeinflussversuchen. In a ist das Bauteil unmittelbar nach Eintauchen und vor dem Einschalten des Rührers zu sehen. Die Bilder b, c und d zeigen das Rührgefäß im laufenden Betrieb nach einer bzw. fünf Minuten und kurz vor vollständiger Auflösung. In e ist dann das Kupferbauteil mit der verfahrenstypischen weißen Innenfläche abgebildet.

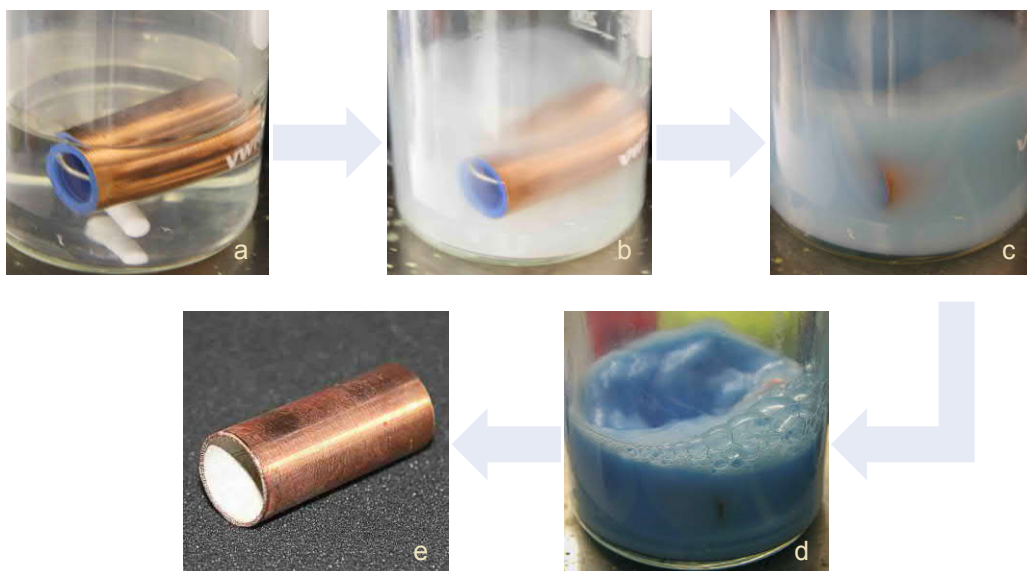


Bild 4-9: Darstellung der Versuche zum Farbeinfluss

Für die Versuche zum Farbeinfluss sollen galvanisch beschichtete Bauteile verwendet werden, an denen im späteren Verlauf auch eine Betrachtung der entstehenden Kupferflächen möglich ist. Aufgrund des hohen Aufwandes in der Galvanik, die dem Lehrstuhl nicht zur Verfügung steht, werden die Versuche pro Farbe und Zustand nur jeweils ein Mal durchgeführt. Pro Zustand bedeutet in diesem Fall unbehandelt und mit Aceton geglättet für spätere Betrachtungen. In Anbetracht der minimalen Standardabweichung bei allen bisherigen Auflöserversuchen ist dennoch von zuverlässigen Ergebnissen auszugehen, zudem der relativ einfache Versuchsaufbau kaum Fehler in der Durchführung zulässt. Als Probekörper wird der in Bild 4-10 dargestellte Hohlzylinder verwendet.

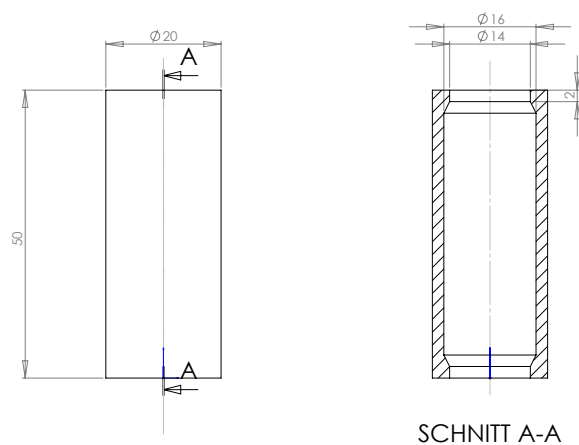


Bild 4-10: Probekörper für die Versuche zum Farbeinfluss

Die einfache Geometrie bietet verschiedene Vorteile. Zum einen bildet der Innenraum einen gut durchströmbaren Bereich, der ein relativ zügiges Auflösen ermöglichen sollte und die Versuche nicht unnötig verlängert. Zum anderen kann der Probekörper ohne Supporterzeugung aufrecht erstellt werden. Dadurch ist, wie in Kapitel 3.4 dargestellt, sowohl der Faktor von unbehandelter zu nachbehandelter Oberfläche am höchsten als auch die Rauheit der nachbehandelten Fläche am geringsten. So kann vom deutlichsten Unterschied zwischen dem Auflösen unbehandelter und nachbehandelter Bauteile in dieser Orientierung ausgegangen und die in der Regel bevorzugten, möglichst glatten Oberflächen betrachtet werden. Diese Eigenschaften sind relevant für einen späteren Vergleich von nach- und unbehandelten Bauteilen. Der kleine Überhang stellt ein Hindernis für ein mögliches Überwachsen der Kupferabscheidung in den innenliegenden Bereich dar.

Die Ergebnisse der unbehandelten Bauteile sind in Bild 4-11 dargestellt. Die Auflöszeit unterscheidet sich trotz identischer Bedingungen bei den verschiedenen Farben. Die kürzeste Zeit wird für die Farbe Gelb benötigt. Mit 38 Minuten beträgt sie nur ca. 39,6 % der Zeit, die für die Auflösung des grauen Probekörpers aufzuwenden ist.

Auffällig ist, dass die tendenziell dunkleren Farben, also Blau, Grau und Schwarz die größte Beständigkeit zeigen. Die eher hellen Farben Gelb und Orange liegen mit einer Differenz von etwa 50 bzw. 40 Minuten deutlich darunter. Dazwischen befinden sich die Farben Elfenbein, Weiß, Rot und Grün mit Zeiten zwischen 54 und 70 Minuten.

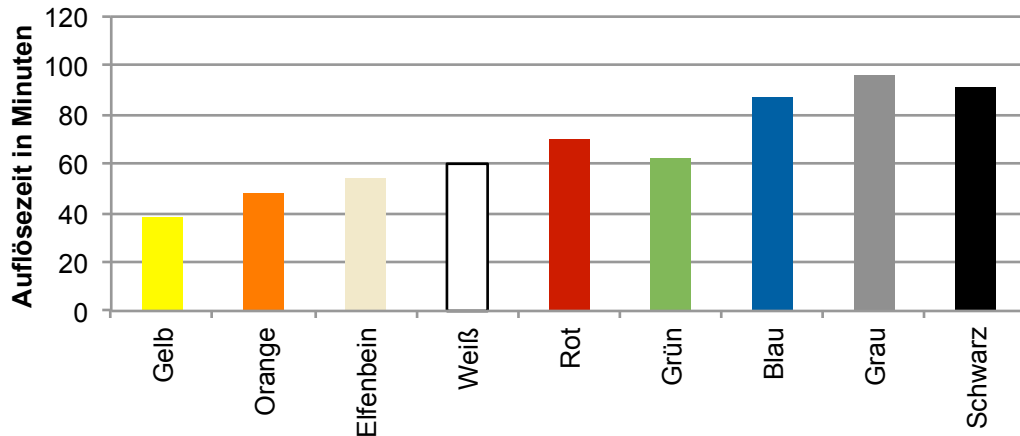


Bild 4-11: Einfluss von Farbstoffen auf die Auflösegeschwindigkeit

Eine Mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Auflösezeiten kann durch Betrachtung der hauptsächlichen Verbindungselemente der Farbmittel erfolgen. Beim Dispergieren von Farbpigmenten werden Kohlenstoff-Doppelbindungen des Kunststoffes gelöst. Diese verbinden sich dann mit den Elementen der jeweiligen Farbmittel. Durch die unterschiedlichen Elemente der einzelnen Farben ist auch von unterschiedlichen Auswirkungen auf die Eigenschaften des Werkstoffes auszugehen. [200] [207] [208] Bindungsenergien zwischen Atomen sind unter anderem durch den Bindungsabstand beeinflusst, der mit zunehmender Atomgröße ebenfalls größer wird. Demnach steigen die Bindungsabstände durch zunehmende Ordnungszahlen der Elemente und die damit verbundene höhere Anzahl an Elektronen und Schalen. Da die Bindungsenergie mit zunehmendem Atomabstand sinkt, sollte die Solvation bzw. das endgültige Lösen der Verbindungen mit zunehmender Atomgröße schneller fortschreiten. [177] [209] Weder durch eine Literatur- und Patentrecherche noch eine Anfrage beim Hersteller konnte die genaue Zusammensetzung der Materialien bzw. der genutzten Farbmittel ermittelt werden. Somit erfolgt für den Versuch der Erklärung die Annahme des Vorliegens der laut Standardliteratur häufig verwendeten Mittel [138] [201] [207] [208]. Tabelle 4-2 listet die zur Verfügung stehenden Farben gemeinsam mit dem in der Regel verwendeten Farbpigment, dem zugehörigen Hauptelement, seiner Ordnungszahl bzw. der Periode und der benötigten Zeit bis zur vollständigen Auflösung des Probekörpers auf. Der Vergleich zeigt, dass die Erklärung auf die Praxis bezogen werden kann. Mit zunehmender Periode und somit zunehmender Anzahl an Schalen und größer werdendem Atom sinkt die benötigte Zeit. Die

Erklärung legt gerade in Anbetracht der kaum theoretisch bestimmbaren Chemikalienbeständigkeit von Pigmenten und Farbeinstellungen [58] keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Das Verhalten hängt mit Sicherheit noch von weiteren wesentlichen Faktoren ab, jedoch kann durch diesen Zusammenhang eine grobe Einschätzung des Anwenders vorgenommen werden. Vor allem aber geben die Ergebnisse klare Hinweise auf die zu verwendenden Farben für eine wirtschaftliche Fertigung.

Tabelle 4-2: Einfluss der Ordnungszahl auf den Auflösevorgang

Farbe	Farbpigment	Verbindungselement	Ordnungszahl	Periode	Zeit [Min]
Gelb	Bismutvanadat	Bi	83	6	38
Orange	Cersulfid	Ce	58	6	48
Elfenbein	Calziumphosphat	Ca	20	4	54
Weiß	Titandioxid	Ti	22	4	60
Rot	Eisenoxidrot	Fe	26	4	70
Grün	Chromoxidgrün	Cr	24	4	62
Blau	Ultramarinblau	S/Si/Al/Na	16/14/13/11	3	87
Grau	Graphit/Ruß	C	6	2	96
Schwarz	Ruß	C	6	2	91

4.1.4 Einfluss der chemischen Nachbearbeitung

Hauptbestandteil der vorliegenden Arbeit ist die Betrachtung der Auswirkungen der chemischen Glättung von Bauteilen. Diese bietet sich im Einsatz von FLM-Bauteilen in der Galvanik konsequenterweise zur Vorbereitung der Modelle an. Demnach ist zu berücksichtigen, ob die Nachbehandlung Auswirkungen auf das Auflöseverhalten hat. Bild 4-12 zeigt die Auflösezeiten der mit Aceton nachbehandelten Bauteile (jeweils rechter Balken) im Vergleich zu den unbehandelten.

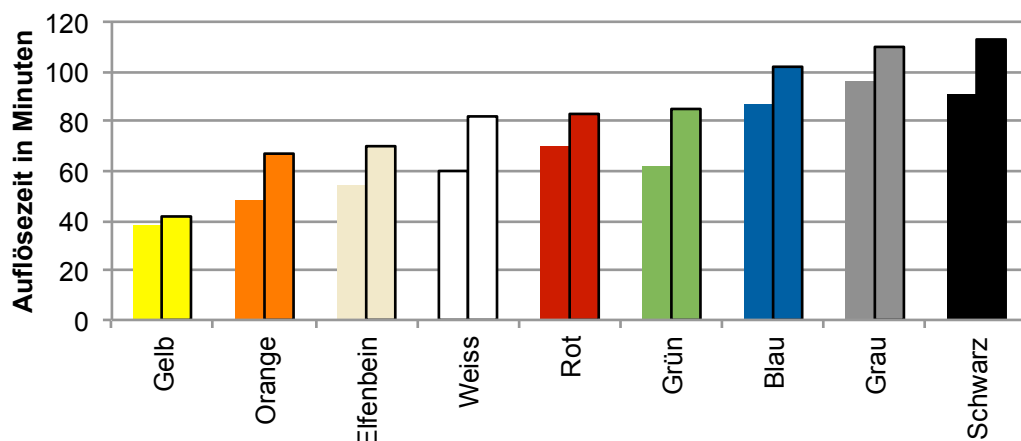


Bild 4-12: Einfluss der Nachbehandlung auf die Auflösegeschwindigkeit

Die Darstellung zeigt eine farzunabhängige Tendenz der notwendigen Verweildauer. Dies lässt auf die Zuverlässigkeit der Versuche schließen. So ist die Reihenfolge bis zur vollständigen Auflösung nahezu identisch. Lediglich Rot und Grün bzw. Grau und Schwarz wechseln die Rangfolge. Aufgrund der gleichen Anzahl an Schalen trifft insgesamt die Reihenfolge jedoch zu. Bei allen Farben erhöht sich die Zeit mit der Glättung. Bild 4-13 zeigt die prozentuale Verlängerung der einzelnen Farben und den Gesamtmittelwert. Zwar weichen einige Farben deutlich von diesem ab, aufgrund der fehlenden Versuchswiederholung sind diese Differenzen jedoch nicht zu überinterpretieren. Zur Absicherung sollten genauere Betrachtungen folgen, die für eine erste Einschätzung jedoch nicht notwendig sind, da hier nur der generelle Vergleich zwischen unbehandelten und nachbehandelten Bauteilen relevant ist.

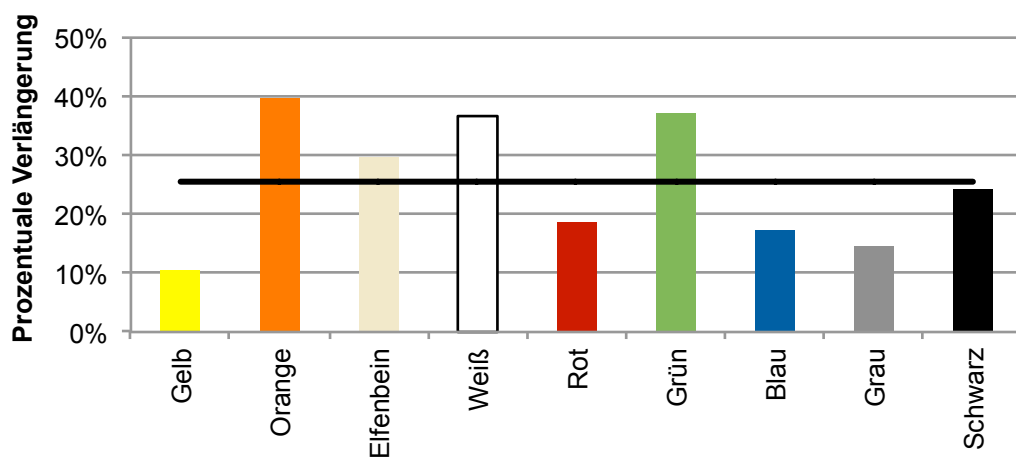


Bild 4-13: Prozentuale Verlängerung der Auflösezeiten

Eine Erklärung der erhöhten Auflösezeiten kann wieder durch den Vergleich mit der Flüssigkeitserosion bzw. Erosionskorrosion erfolgen. Dabei sind Abweichungen von einer idealen Oberfläche von großer Bedeutung. Durch eine erhöhte Rauheit wird die Strömung gestört und die Beeinträchtigung durch das Fluid erhöht. Außerdem bietet eine hohe Rauheit eine wesentlich größere Angriffsfläche bezüglich der Einwirkung des Acetons, wodurch der Prozess ebenfalls beschleunigt wird. [204] [210] Zudem erfolgt durch die Behandlung mit Aceton, wie in Kapitel 3.6.5 beschrieben, eine deutliche Reduzierung der Durchlässigkeit. Somit werden offene Bauteilstellen und Poren geschlossen und ein Eindringen der Chemikalie deutlich erschwert. Mit durchschnittlich 25 % Zeitersparnis bei unbehandelten Innenflächen zeigt sich ein großes Potential, welches im Einzelfall zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Bauteils bzw. des Prozesses führt. Im einfachen Fall der verwendeten Hohlzylinder könnten durch das Eindrehen von Schrauben auf beiden Seiten des Bauteils die Innenflächen vor der Nachbehandlung geschützt werden. Somit erhält die Außenseite die gewünschte, glatte Oberfläche, während im Inneren die für das Auflösen vorteilhafte, treppenstu-

fenbehaftete Oberfläche vorherrscht. Bei komplexeren Bauteilen kann das Abdichten von Ein- und Ausläufen auch durch Wachs oder ähnliches geschehen.

4.1.5 Einfluss des verwendeten Supportmaterials

Bislang wurde lediglich das eigentliche Baumaterial ABS betrachtet. Beim Einsatz des FLM wird aber in der Regel ein zusätzliches Supportmaterial verwendet, welches der Abstützung von Hohlräumen und Überhängen sowie als Trennschicht zwischen Bauplattform und Bauteil dient [211]. Je nach Bauteilgeometrie kann es sich demnach auch bei der Herstellung von Kernen für die Galvanoformung im Inneren des Bauteiles befinden, wenn dieses zur Materialersparnis hohl gebaut ist. Es stellt sich nun die Frage, ob ein nicht vollständiges oder gar kein Entfernen zu Nachteilen führt.

Im Fall der Dimension 1200es SST der Firma Stratasys handelt es sich um ein wasserlösliches Material. Der Werkstoff wird von der Firma Polymer Chemistry Innovations unter dem Namen Aquazol vertrieben [212]. Zur Beschleunigung des Auswaschvorganges bietet Stratasys einen Wasserumwälztank an, der mit einem zusätzlichen Konzentrat betrieben und beheizt werden kann. [213] Die sehr gute Wasserlöslichkeit [212] lässt auch ohne Betrachtung der chemischen Zusammensetzung in Anbetracht des Grundsatzes „Gleiches löst Gleiches“ darauf schließen, dass es sich bei dem Material mit der chemischen Bezeichnung Poly(2-ethyl-2-oxazolin) um einen polaren Stoff handelt. [137] [214] Die Löslichkeit in Aceton ist somit gewährleistet. Zudem wird durch Herstellerangaben die sehr gute Löslichkeit in den meisten polaren organischen Lösemitteln bestätigt [215].

In einem kurzen Versuch soll dieser Zusammenhang überprüft werden. Experimentell wurde ein Grundkörper ermittelt, dessen Support unterhalb des Bauteils ein Gewicht von ca. 1 g aufweist. Es folgt das Auflösen des Supports in 100 ml Aceton nach mechanischer Trennung vom Bauteil. Die Bedingungen aus Kapitel 4.1.1, also eine Geschwindigkeit von 2000 min^{-1} und eine Temperatur von $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sind dabei zu übernehmen. Der Versuch zeigt, dass Poly(2-ethyl-2-oxazolin) nach nur ca. 4 bis 5 Minuten vollständig aufgelöst ist. Der Vergleich mit ABS zeigt eine Reduzierung der Zeit um ca. 75 %. Zwar ist aufgrund der abweichenden Geometrie kein direkter Zusammenhang herzustellen, jedoch zeigt die deutliche Abweichung, dass die Zeit durch den Verbleib von Supportmaterial nicht beeinträchtigt wird. Aus diesem Zusammenhang lassen sich wesentliche Handlungshinweise für die Herstellung von Galvanikern herleiten. Auf das Entfernen von innenliegenden Supportstrukturen kann theoretisch gänzlich verzichtet werden. Wichtig ist dabei, dass außenliegende Supportstrukturen selbstverständlich vor der Galvanisierung mechanisch oder durch das herkömmliche Auswaschen zu entfernen sind.

4.2 Oberflächenqualität der galvanischen Abscheidung

Nicht nur bei der Herstellung von FLM-Bauteilen, auch bei der Anwendung in der Galvanoformung sind gute Oberflächen oftmals von entscheidender Bedeutung. Ob die Glättung durch die chemische Nachbehandlung direkt auf die Galvanoformung übertragen wird, soll im folgenden Versuch ermittelt werden. Dazu dient die Betrachtung der Oberflächenrauheit der Außenflächen der FLM Modelle und der späteren Innenflächen des Kupferbauteils nach dem Auslösen. Bild 4-14 zeigt zunächst die gemessenen Ra-Werte für unbehandelte und behandelte ABS-Außenflächen sowie die daraus resultierenden Kupfer-Innenflächen.

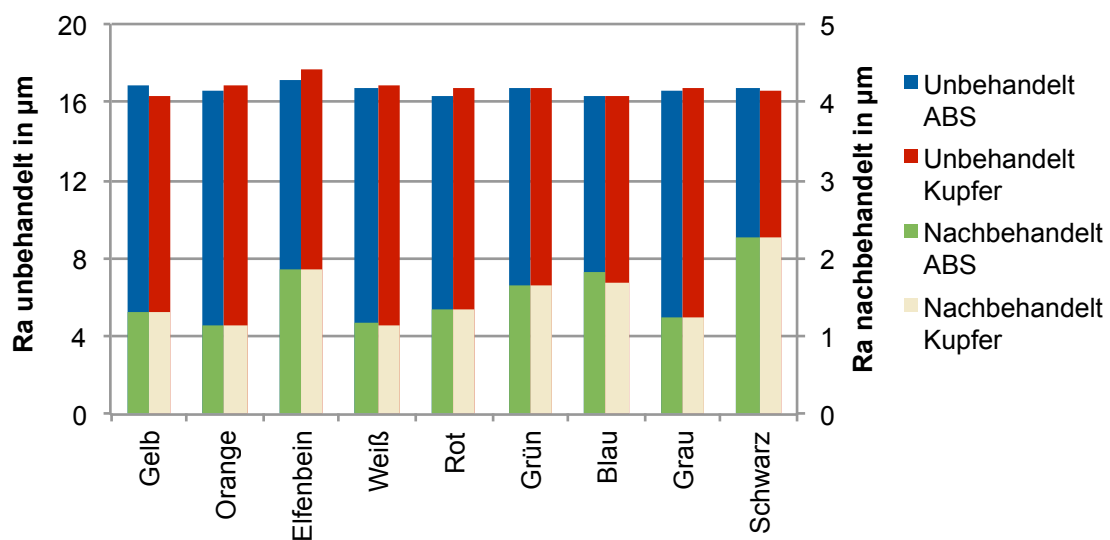


Bild 4-14: Ra der ABS- und Kupferflächen

Zunächst wird deutlich, dass für eine optimale Einwirkzeit der unterschiedlichen Farben eine jeweilige Betrachtung erfolgen muss. Während die Messungen des ABS im unbehandelten Zustand eine Standardabweichung von $0,25 \mu\text{m}$ haben, was einer prozentualen Abweichung vom Mittelwert von ca. 1,5 % entspricht, beträgt sie im nachbehandelten Zustand ca. 25 % ($0,4 \mu\text{m}$). Da es in dieser Betrachtung jedoch nicht um die Unterschiede zwischen den Farben, sondern zwischen ABS und Kupfer geht, ist diese Diskrepanz nicht relevant, zeigt aber weiteren Handlungsbedarf für die Nachbearbeitung von FLM-Bauteilen auf. In beiden Zuständen sind sofort die nur minimalen Differenzen zwischen ABS und Kupfer zu erkennen. Dies spricht für eine sehr gute Übertragung der Struktur der FLM-Oberfläche auf das abgeschiedene Kupfer und zeigt deutlich die große Bedeutung der Nachbehandlung für den Einsatz in der Galvanoformung. In unbehandeltem Zustand unterscheiden sich beide Oberflächen um durchschnittlich 1,27 % voneinander, im nachbehandelten Zustand nur um 1,2. Unter Vernachlässigung der beiden größten Ausreißer Blau und Weiß mit 6,22 bzw. 2,35 % beträgt der Mittelwert sogar nur 0,4 %. Um auch den Zusammenhang

zwischen ABS und Kupfer im Hinblick auf einzelne Rauheitsspitzen zu erkennen, sind die Ergebnisse für die gemittelte Rautiefe Rz in Bild 4-15 dargestellt.

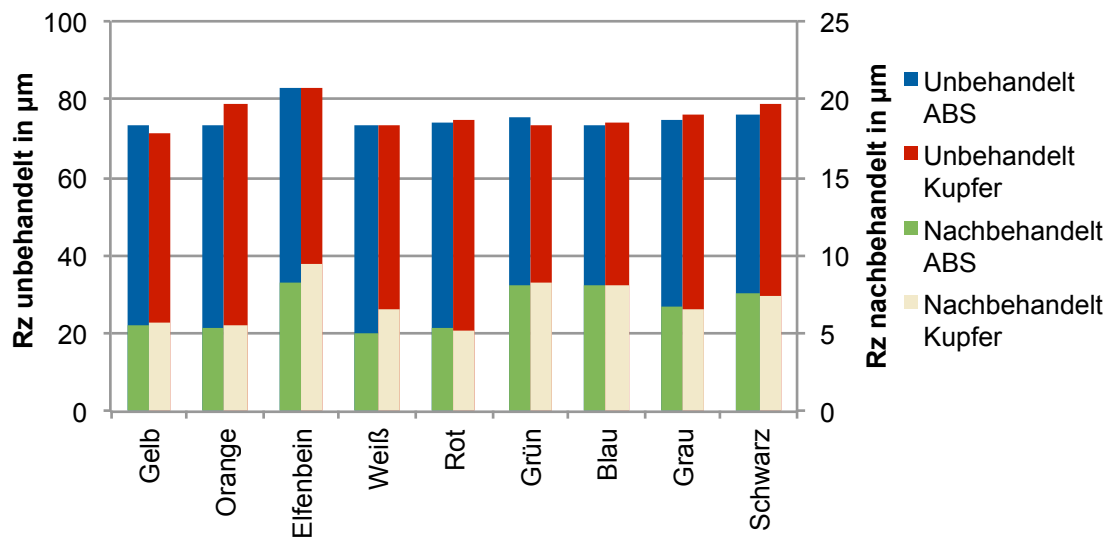


Bild 4-15: Rz der ABS- und Kupferflächen

Auch hier ist der Bedarf der Anpassung der Nachbehandlungszeit bezüglich der unterschiedlichen Farben zu sehen. Die Abweichung der unbehandelten Bauteile liegt bei 3,1 μm und 4 %, die der nachbehandelten bei 1,4 μm und somit ca. 21 %. Die Differenzen zwischen ABS und Kupfer zeigen auch im Bezug auf Rauheitsspitzen die gute Übertragbarkeit. Sie betragen für den unbehandelten Zustand 2,26 % und für den nachbehandelten Zustand 6,6 %, wobei sich der zweite Wert unter Vernachlässigung der Ausreißer Elfenbein und Weiß (13,7 und 28,6 %) auf 2,9 % reduziert. Die Ergebnisse führen insgesamt zu einer guten Möglichkeit der Auslegung von galvanisch hergestellten Bauteilen auf FLM-Basis. Durch die gute Übertragbarkeit können dafür die Ergebnisse der Rauheitsuntersuchungen herangezogen werden, wobei der Einfluss der verschiedenen Farben zu berücksichtigen ist. Ein direkter Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Auflösezeiten und der erreichbaren Rauheit bei identischer Einwirkzeit kann auf Grundlage der hier durchgeführten Arbeit nicht gezogen werden. Dafür wäre die Anzahl der jeweils bewerteten Bauteile zu gering.

4.3 Herstellung von FLM-Kernen

Für die Herstellung von Bauteilen für die Galvanoformung ist auf einen möglichst geringen Materialeinsatz für eine schnelle Auflösung zu achten. Im Folgenden soll kurz auf die wesentlichen Aspekte und anlageninternen Möglichkeiten eingegangen werden. Zunächst erfolgt eine Betrachtung der Materialverbräuche und Bauzeiten für die einfache Geometrie eines Würfels bei den verschiedenen Einstellmöglichkeiten der verwendeten Anlage. Es werden die Werte für Würfel von 10, 50 und 100 mm Kan-

tenlänge in verschiedenen Kombinationen der Modellparameter „vollgefüllt“, „Sparse, (geringe Dichte)“ und „Sparse, (hohe Dichte)“ sowie der Supportparameter „minimal“, „basic“ und „teilgefüllt“ herangezogen. Der Würfel für die Variation der Supportparameter ist dabei hohl mit einer Wandstärke von 1 mm konstruiert, sodass die Außenstruktur durch jeweils zwei Materialbahnen dargestellt wird. Die Füllung des Innenbereiches erfolgt durch die entsprechend eingestellte Supportwahl. Die unterschiedlichen Modellparameter werden an Vollkörpern überprüft. Die Variation des Supportparameters ist dabei nicht entscheidend, da der Bereich unterhalb des Würfels unabhängig davon identisch bleibt. Für die Herstellungskosten spielt es keine Rolle, ob im Inneren des Bauteils Support oder Baumaterial verwendet wird, da die Materialkosten identisch sind [107]. Die aus der Maschinensoftware ausgelesenen Daten sind in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Material- und Zeitverbrauch unterschiedlicher Würfel

Bauteil [cm ³]		Modell- parameter	Support- parameter	Bauzeit [min]	Bau- material [cm ³]	Support- material [cm ³]	Gesamt- material [cm ³]
1	Vollkörper	vollgefüllt	teilgefüllt	6	0,94	0,18	1,12
		Sp. gering	teilgefüllt	6	0,92	0,18	1,1
		Sp. Hoch	teilgefüllt	5	0,94	0,18	1,12
	Hohlkörper	vollgefüllt	minimal	12	0,53	0,53	1,06
		vollgefüllt	basic	12	0,53	0,53	1,06
		vollgefüllt	teilgefüllt	12	0,53	0,53	1,06
125	Vollkörper	vollgefüllt	teilgefüllt	190	127,49	2,35	129,84
		Sp. gering	teilgefüllt	104	36,58	2,35	38,93
		Sp. Hoch	teilgefüllt	166	98,13	2,35	100,48
	Hohlkörper	vollgefüllt	minimal	163	15,16	44,19	59,35
		vollgefüllt	basic	163	15,16	44,28	59,44
		vollgefüllt	teilgefüllt	124	15,16	19,39	34,55
1000	Vollkörper	vollgefüllt	teilgefüllt	1282	1016,4	8,28	1024,68
		Sp. gering	teilgefüllt	468	213,71	8,28	221,99
		Sp. Hoch	teilgefüllt	1038	761,53	8,28	769,81
	Hohlkörper	vollgefüllt	minimal	796	61,65	359,66	421,31
		vollgefüllt	basic	796	61,65	360,03	421,68
		vollgefüllt	teilgefüllt	462	61,65	125,02	186,67

Für den kleinsten Würfel von 1 cm³ liegt hinsichtlich des Materialverbrauches nahezu kein Unterschied zwischen den einzelnen Einstellungen vor. Als Vollkörper kann lediglich durch die Einstellung „geringe Dichte“ das Baumaterial von 0,94 auf 0,92 cm³ reduziert werden. Als Hohlkörper liegen bei allen Einstellungen identische Werte vor. Der Wechsel von Material- auf Supportherstellung in jeder Schicht führt jedoch zur Verdopplung der Zeit von 6 auf 12 Minuten. Für derart kleine Bauteil ist daher von einer hohlen Struktur abzuraten, da dies eine Zeiterhöhung ohne Materialeinsparung bewirkt. Der Materialverbrauch ist durch die Addition von Bau und Supportmaterial nahezu identisch. Der nächstgrößere Würfel mit einem Volumen von 125 cm³ zeigt

deutlichere Unterschiede. Während die Bauzeit bei Vollkörpern durch die Einstellung von „geringe Dichte“ von 190 auf 104 Minuten reduziert wird, sinkt der Materialverbrauch noch stärker von ca. 127 auf nur noch 37 cm³. Die Hülle des Hohlkörpers benötigt nur 15 cm³. Um den inneren Bereich mit Support zu füllen, sind bei der Einstellung „teilgefüllt“ 19 cm³ erforderlich. Insgesamt können durch die Hohlstruktur demnach ca. 4,4 cm³, etwa 11 % eingespart werden. Die Gesamtbauzeit hingegen steigt um etwa 20 % von 104 auf 124 Minuten. Die Tendenzen des Würfels mit einem Volumen von 1000 cm³ sind identisch, jedoch noch deutlicher ausgeprägt. Im Vergleich zum vollgefüllten Vollkörper kann der Materialverbrauch durch die Einstellung „geringe Dichte“ von 1016 auf 214 cm³ reduziert werden. Die Hülle des Hohlkörpers benötigt aber nur ca. 62 cm³ und bei der Einstellung „teilgefüllt“ 125 cm³ Supportmaterial, wodurch insgesamt durch den Hohlkörper ca. 16 % eingespart werden können. Die Werkzeugwechsel wirken sich mit zunehmender Bauteilgröße kaum noch auf die Gesamtbauzeit aus. Sie steigt beim großen Würfel nur noch um ca. 1,3 % von 462 auf 468 Minuten.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass durch die Nutzung der anlageninternen Parameter für die Modellherstellung erhebliche Einsparungen bei der Fertigung von FLM-Kernen möglich sind. Da die Stabilität von untergeordneter Rolle ist bzw. bei einer Hüllgeometrie von 2 Strangstärken eine ausreichende Stabilität vorliegt, kann eine Reduzierung durch Hohlkörper mit Supportfüllung bei steigender Bauteilgröße ohne erhebliche Bauzeiterhöhung erfolgen. Es sollte jedoch für das jeweilige Bauteil eine Betrachtung der unterschiedlichen Einstellungen, insbesondere von Hohlkörpern mit teilgefülltem Support und Vollkörpern mit geringer Dichte erfolgen. Durch die hier angenommene Geometrie eines Würfels erfolgt im gesamten inneren Bereich zur Abstützung der oberen Fläche die Füllung mit Support. Bei anders geformten Körpern, beispielsweise aufrecht gebauten Zylindern mit geringen Konturänderungen, kann davon ausgegangen werden, dass nahezu kein Support notwendig ist und somit die Verhältnisse variieren.

Von der Erzeugung eigens gestalteter Gitterstrukturen kann aufgrund der schon sehr geringen Materialverbräuche durch die anlageninternen Einstellungen abgeraten werden. Mit der Software AutoFab ist beispielsweise die Erzeugung interner Gitterstrukturen möglich. Je nach Struktur treten dabei jedoch unterschiedliche Probleme auf. Einige führen zur automatischen Generierung von Supportmaterial innerhalb des Bauteils, wodurch eine potentielle Materialeinsparung aufgehoben und die Bauzeit durch Düsenwechsel erhöht wird. Erst bei einer sehr dichten Gitterstruktur findet keine weitere automatische Supportgenerierung statt. Dann sind jedoch im Vergleich zur anlageninternen Einstellung keine Ersparnisse mehr möglich. Manche Strukturen ermöglichen eine Reduzierung des Materials, führen aber zu instabilen inneren

Strukturen und somit zur Instabilität und zum Verzug der Bauteilhülle. Die Nutzung solcher Möglichkeiten ist aufgrund der sehr individuellen Auswirkung auf unterschiedliche Bauteilgeometrien nicht wirtschaftlich. Jeweils müsste individuell eine passende Gitterstruktur ermittelt werden, die im besten Fall zu nur geringen Einsparungen führen würde. Die Nutzung der herstellereigenen Möglichkeiten ist somit zu bevorzugen. Generell ist dabei, wie auch bei Gussanwendungen, auf Öffnungen zu achten, die jedoch in diesem Anwendungsfall nicht als Entlüftungsöffnungen [75] [76] [77], sondern als Ein- und Ausläufe für das Aceton während des Auflöses dienen.

4.4 Applikationsbeispiel

Die Möglichkeit zur Anwendung in der Galvanoformung soll an einem Beispiel veranschaulicht werden. In Kooperation mit den Firmen Galvano-T GmbH und NTP-Ingenieure GmbH & Co.KG sowie dem Lehrstuhl für Raumfahrttechnik der Technischen Universität München erfolgte die Herstellung eines 1 auf 2 Hohlleiterteilers. Der Ablauf der Fertigung ist in Bild 4-16 dargestellt.

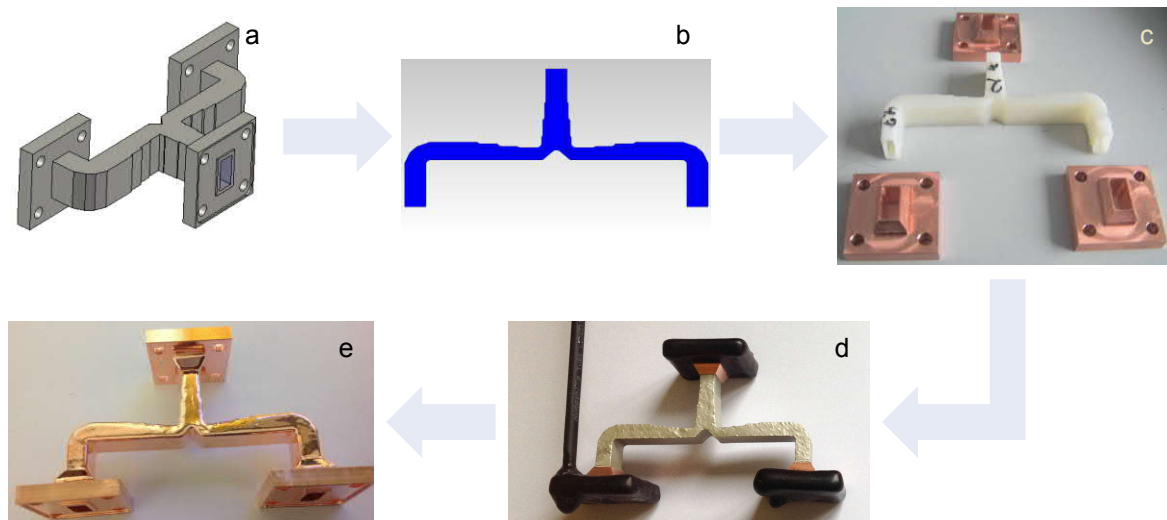


Bild 4-16: Herstellung eines Hohlleiterteilers (a, c aus [216]; e, d aus [217])

In a ist zunächst das ursprüngliche CAD-Modell des Bauteils zu sehen. B zeigt das daraus abgeleitete Modell zur Herstellung durch das FLM. Dieses ist als Hohlkörper gestaltet, um ein Durchströmen mit Aceton bei der späteren Auflösung des ABS zu ermöglichen. Die Anschlüsse werden aufgrund der Standardmaße und der nicht notwendigen Anpassung und Individualisierung aus Kupfer fräsend hergestellt. Sie sind in c gemeinsam mit dem geglätteten FLM-Bauteil abgebildet. In d ist die für die Galvanik vorbereitete Baugruppe dargestellt. Das ABS ist mit Silberspray als leitende Startschicht beschichtet und die Anschlüsse aufgesteckt. Um diese nicht durch die Galvanik beschichten zu lassen, sind sie entsprechend isoliert. Bereiche am Übergang zum ABS sind frei jeglicher Isolation. Somit kann in diesem Bereich eine Ver-

bindung zwischen der Beschichtung des ABS und den Anschlüssen entstehen. Am unteren linken Anschluss ist die Verbindung zur Gleichstromquelle platziert. Durch das Silberspray findet somit eine Kontaktierung der gesamten Baugruppe statt. Das endgültige Bauteil ist in e abgebildet. Nach Erreichen der geforderten Schichtdicke kann das ABS aufgelöst und die Isolierung entfernt werden. Eine Schichtdickenmessung ergibt Werte zwischen 0,36 und 0,5 mm [216]. Erste Begutachtungen und Vermessungen sind positiv hinsichtlich der erreichten Oberflächengüte, zeigen jedoch Probleme bezüglich der Maßhaltigkeit. Diese ist zwar nicht durch die Nachbehandlung maßgeblich beeinflusst, jedoch durch die hohe Schichtstärke von 0,254 mm ohnehin nicht optimal. Die Vermessung des Verhaltens im Einsatz zeigt Abweichungen zur theoretischen Anpassung im Frequenzbereich, die noch in einem akzeptierbaren Bereich liegen. Abweichungen im Aufteilungsverhältnis und somit Verluste sind relativ hoch. Dennoch kann der dargestellten Fertigung ein gutes Potential zugesprochen werden, welches in erster Linie aufgrund der Maßhaltigkeit an Grenzen stößt. [217] Anlagen mit geringeren Schichtstärken, die bereits am Markt verfügbar sind, können hier Abhilfe schaffen und in Kombination mit der Oberflächenglättung zu entscheidenden Verbesserungen führen.

Generell zeigt die Fertigung des relativ filigranen Bauteils ein zu beachtendes Verhalten bei der Oberflächennachbehandlung vor der Galvanik. Bild 4-17 zeigt dazu die Innengeometrie mit Detailansicht.

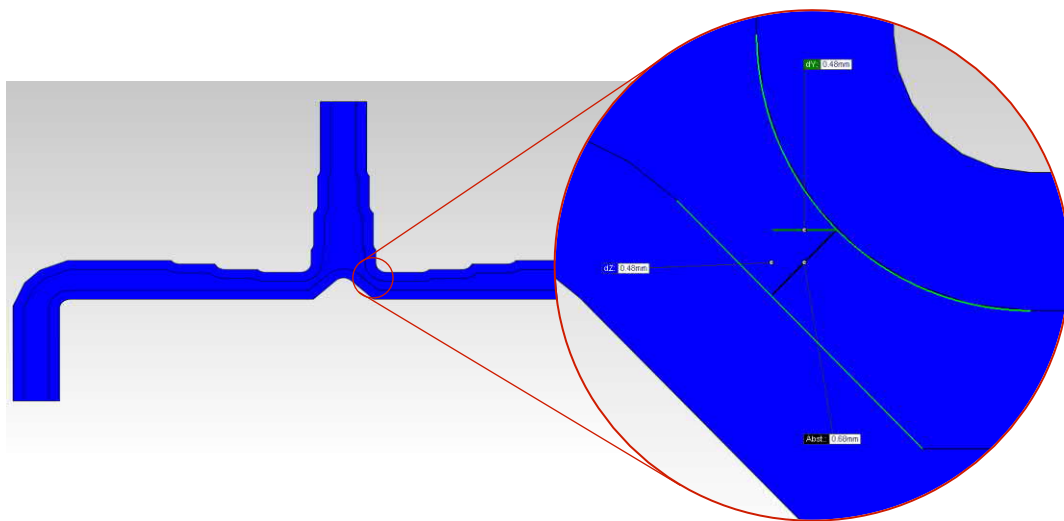


Bild 4-17: Innengeometrie des Hohlleiterkerns

Der Spalt beträgt in dem dargestellten Bereich lediglich 0,7 mm. Durch die Öffnungen an den Anschlüssen, die für das spätere Auflösen notwendig sind, gelangt Aceton während der Nachbearbeitung in den Innenbereich. Durch die schnelle Reaktion entsteht ein ABS-Aceton-Gemisch, welches den Bereich verschließt und nicht abfließen kann. Daraus resultieren zwei Probleme in der weiteren Bearbeitung. Zum einen

wirkt das eingeschlossene Medium weiter und führt bei der geringen Wandstärke des Bauteils zum Verzug, der von außen sichtbar wird. Des Weiteren kann der Bereich beim späteren Auflösen nicht durchströmt werden. Das zugeführte Aceton löst das ABS, kann dann aber nicht abfließen. Erst das absaugen mit einer Pipette führt zur endgültigen Entfernung. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Konstruktion von dünnwandigen Deckeln im Anschlussbereich, die direkt mit dem Modell erzeugt werden. Für das später Auflösen sind die Bereiche durchzustößen oder vorsichtig durchzubohren. Der Vorteil der kürzeren Auflösezeiten bei rauen Oberflächen führt dann zudem zur Prozessbeschleunigung.

4.5 Recycling

Die Berücksichtigung von umwelttechnischen Aspekten spielt in der Entwicklung und Konstruktion eine zunehmend große Rolle. Dabei tritt auch die Rückführbarkeit von verwendeten Werkstoffen in den Fokus. Durch eine entsprechende Gestaltung von Prozessen können unter Betrachtung der genannten Aspekte nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Ziele erreicht werden. [218] Bei der vorgestellten Fertigung durch die Galvanoformung unter Einbezug von FLM-Modellen entsteht durch das Auflösen des ABS ein Gemisch aus Kunststoff und Aceton, welches durch die zunehmende Sättigung ab einem zu geringen Wirkungsgrad auszutauschen ist. Zur Steigerung der Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit erfolgt die Verwendung des in Bild 4-18 gezeigten Rotationsverdampfers zu Testzwecken. Dabei soll die generelle Möglichkeit des Recyclings aufgezeigt, nicht aber durch Studien quantifiziert werden.



Bild 4-18: Eingesetzter Rotationsverdampfer der Firma Heidolph [219] [220]

Rotationsverdampfer kommen zur schnellen und schonenden Destillation von Lösemitteln, also deren Reinigung oder Trennung zum Einsatz. Mithilfe eines Heizbades wird die im rotierenden Destillationskolben vorliegende Flüssigkeit zur Verdampfung gebracht. Die Rotation erwirkt dabei eine Beschleunigung des Prozesses, da sich somit permanent ein dünner Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche des Kolbens befindet. Der Dampf steigt entlang des Kühlers auf, an dem es abschließend zur Kondensation des Lösemittels kommt, wodurch es in den Auffangkolben tropft. [220] Die Anwendung hat gezeigt, dass nahezu das gesamte ABS aus dem Aceton gelöst werden kann. Genauere Analysen sind dabei nicht erfolgt. Die zurückbleibenden ABS Rückstände sind in Bild 4-19 zu sehen.



Bild 4-19: ABS Rückstände nach Destillation [216]

Eine Wiederverwendung bzw. Aufbereitung des ABS für das FLM oder andere technische Prozesse ist theoretisch denkbar. Durch stoffliches Recycling kann sortenreines und unvermisches ABS unter Beibehaltung der chemischen Struktur und der stofflichen Eigenschaften zu Mahlgütern oder Recyclaten verarbeitet werden. [221] Da durch die Einwirkung von Aceton nur reversible Veränderungen stattfinden [58], ist von einer Verwendbarkeit der Rückstände auszugehen. Die Qualität des Recyclates hängt in erster Linie von der sortenreinen Trennung ab [222]. Demnach wäre bei einer möglichen Destillation und Verarbeitung der Rückstände darauf zu achten, dass sich keine Supportreste im oder am Bauteil befinden, bevor es mit Aceton aufgelöst wird. Wird die Destillation nur zur Rückgewinnung des Acetons und zur Entsorgung des Kunststoffes eingesetzt, ist die Sortenreinheit von untergeordnetem Interesse. Grundsätzlich entstehen durch die Fragestellung des Recyclings neue Ansätze, die in weiterführenden Untersuchungen aufgegriffen werden können. Neben dem Grad der Reinheit des destillierten Acetons ist in erster Linie die Qualität und Verwendbarkeit des zurückbleibenden Kunststoffes von großem Interesse.

5 FLM-Galvanikblenden

In der Galvanik werden oftmals kleine Flächen von großen Bauteilen beschichtet oder ein Bauteil soll nur an einer definierten Fläche, also in eine definierte Richtung wachsen. In der Regel werden nicht zu beschichtende Elemente mit nicht leitenden Materialien abgedeckt. Das Auftragen von Wachs ist dabei eine gängige Methode. Das Abschirmen mit an das Bauteil angepassten Blenden ist nicht geläufig. Zur Anwendung kommen Blenden lediglich zur Beeinflussung der Feldlinien, wie bereits in Bild 2-8 verdeutlicht. Diese werden als Barriere zwischen Anode und Kathode gebracht und ermöglichen so gleichmäßigere Abscheidungen. [96] [223] [224] Im Folgenden soll der Einsatz von angepassten und durch das FLM hergestellte Blenden dargestellt werden. Insbesondere die wesentlichen Vorteile der Nachbearbeitung kommen hierbei zum Einsatz. Auch die Flexibilität der additiven Fertigung tritt in den Vordergrund. So ist es möglich, schnell auf Ergebnisse von Versuchen zu reagieren und neue Geometrien umzusetzen. Bild 5-1 zeigt die Grundidee der Abschirmung durch FLM-Blenden anhand einer Testgeometrie.

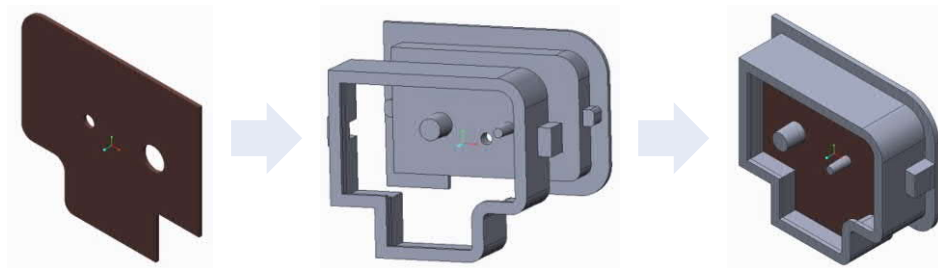


Bild 5-1: Grundprinzip von FLM-Galvanikblenden

Die einzulegende Kupferplatte soll nur von einer Seite beschichtet werden. Zudem sind die vorhandenen Bohrungen vor dem Zuwachsen zu schützen. Dazu wird die Kupferplatte in eine zweiteilige Blende gelegt, die das Bauteil an der Hinterseite abdeckt, die Bohrungen mit Zylindern schließt und eine galvanische Abscheidung nur in eine Richtung ermöglicht, die Platte also auch nicht an den Seiten an Form verlieren kann.

5.1 Probleme unbehandelter FLM-Blenden

Bei den ersten Versuchen FLM-Blenden herzustellen, die es ermöglichen auf einer definierten Fläche abzuschneiden, treten Probleme mit der rauen und undichten Struktur des Materials auf. Diese sind in drei wesentliche Kategorien zusammenzufassen.

5.1.1 Detailgetreue Abscheidung an FLM-Bauteilen

Einer der wesentlichen Vorteile der galvanischen Abscheidung ist die Detailtreue. Die Betrachtungen der Oberflächen von Kern und Abformung in Kapitel 4.2 zeigen dies deutlich durch die nahezu identischen Oberflächenqualitäten. Beim Einsatz von Blenden, die in direktem Kontakt mit dem zu beschichtenden Material stehen und somit entlang der Blenden ein Wachstum von Kupfer stattfindet, wird diese genaue Abbildung zum Hindernis der Wiederverwendbarkeit. Bild 5-2 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

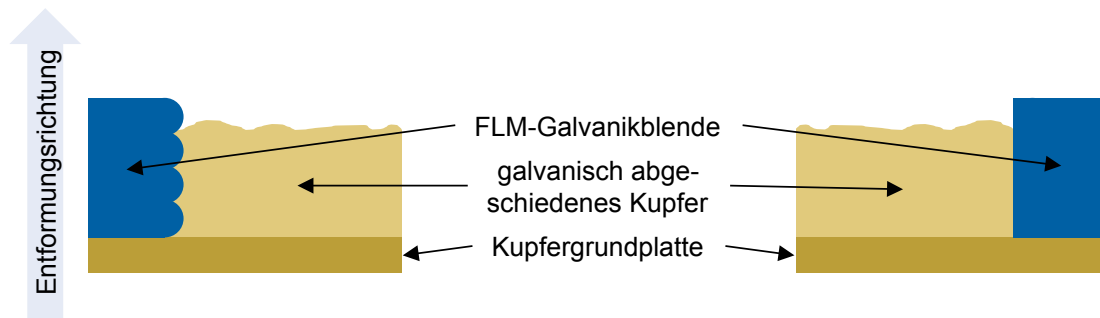


Bild 5-2: Entformungsproblem unbehandelter Blenden

Der links dargestellte Fall einer unbehandelten Blende mit deutlichem Schichteffekt macht ein zerstörungsfreies Entformen nahezu unmöglich. Dies ist besonders dann der Fall, wenn durch die Blende ein umschlossener Bereich definiert ist und ein seitliches Wegziehen nicht erfolgen kann. Die Nachbehandlung der FLM-Blenden glättet die Flächen jedoch so stark, dass die Entformung gewährleistet ist. Ist generell eine spanende Nachbearbeitung des Kupfers vorgesehen, kann die leichte Entformbarkeit durch das zusätzliche Vorsehen von Entformungsschrägen weiter verbessert werden. Die Nachbehandlung ermöglicht somit die Wiederverwendbarkeit der Blenden und deren Einsatz unter Verzicht auf die Konstruktion mehrteiliger Blenden, die zu weiteren Prozessfehlern führen würden.

5.1.2 Undichtheit der FLM-Bauteilstruktur

Die in Kapitel 3.6.5 beschriebene und bekannte Undichtheit von FLM-Bauteilen stellt sich als weiteres Problem heraus. Gerade bei dünnwandigen Elementen, die in der x-y-Ebene liegend hergestellt sind, ist die undichte Struktur so ausgeprägt, dass die galvanischen Abscheidungen durch das Material hindurchwachsen können. Der Elektrolyt kann in das Material eindringen und führt zum Kontakt mit der in der Blende liegenden Kupferplatte. Bild 5-3 zeigt im Detailausschnitt a, dass bereits große Teile des hellen FLM-Materials von Kupfer durchsetzt sind, welches bereits farblich durchschimmert. An den Stellen, an denen das Kupfer bereits komplett durchgewachsen ist, bilden sich schnell größere Abscheidungsanhäufungen, da sich in die-

sem Bereich die Stromdichte konzentriert. Eine Trennung der Blende vom eingelegeten Kupferteil ist nicht mehr möglich. Die vorherige Nachbehandlung des ABS und somit die Abdichtung des Materials führt auch hier zur erfolgreichen Abscheidung und verhindert somit die Zerstörung der Blende.

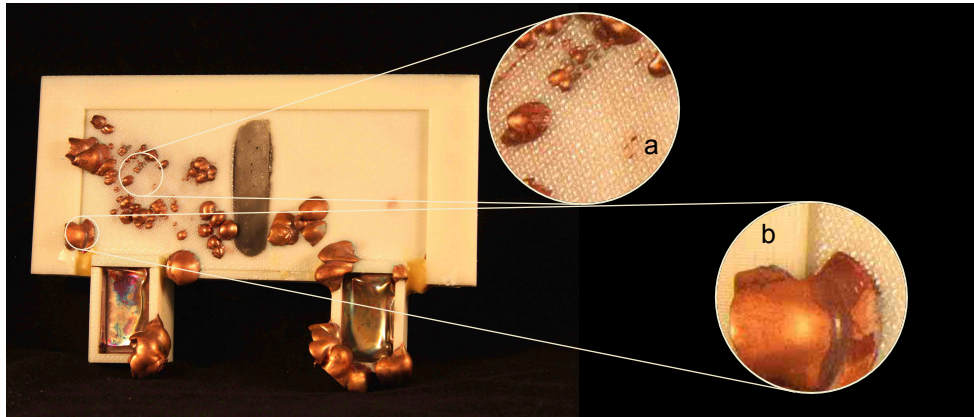


Bild 5-3: Durchwachsen der galvanischen Abscheidung

5.1.3 Passung der unebenen Oberflächenstruktur

Neben dem Durchwachsen des Materials ist in Bild 5-3 ebenfalls das Kupferwachstum an Verbindungsstellen zweier Blendenteile zu sehen. Detailansicht b zeigt dazu die Vergrößerung eines Spaltes, durch den bereits Material gewachsen ist und an dem sich durch die Konzentration der Stromdichte eine große Abscheidung gebildet hat. In erster Linie verhindert die hohe Oberflächenrauheit ein passgenaues Fügen von unterschiedlichen Blendekomponenten. Zu wenig Spiel führt zu einem Verkeilen der Elemente, zu viel hingegen fördert das Durchwachsen. Aus konstruktiver Sicht ist auf eine Mehrteiligkeit der Blenden meist nicht zu verzichten. Durch die Glättung der Oberflächen können sehr feste und dennoch lösbare Verbindungen erfolgen und das Durchwachsen an Verbindungsstellen vermieden werden.

5.2 Auslegung der Blendengeometrie

Durch die Nachbehandlung der FLM-Blenden ist ein wirtschaftlicher Einsatz durch Wiederverwendung und reduzierten Nachbehandlungsbedarf möglich. Erste Versuche zeigen eine sehr gute Trennbarkeit und somit keine Einschränkungen bezüglich der Wiederverwendung. Bei Betrachtung der abgeschiedenen Oberflächen fällt jedoch auf, dass keine homogene Abscheidung stattfindet. Dabei kommt es zu sehr unterschiedlichen Ausprägungen der Abweichungen von einer idealen, planen Oberfläche, die an verschiedenen Stellen des Probekörpers zu lokalisieren sind. Die Unebenheiten können dabei in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Bild 5-4 zeigt exemplarisch einen Probekörper mit einigen der vorkommenden Fehlstellen.

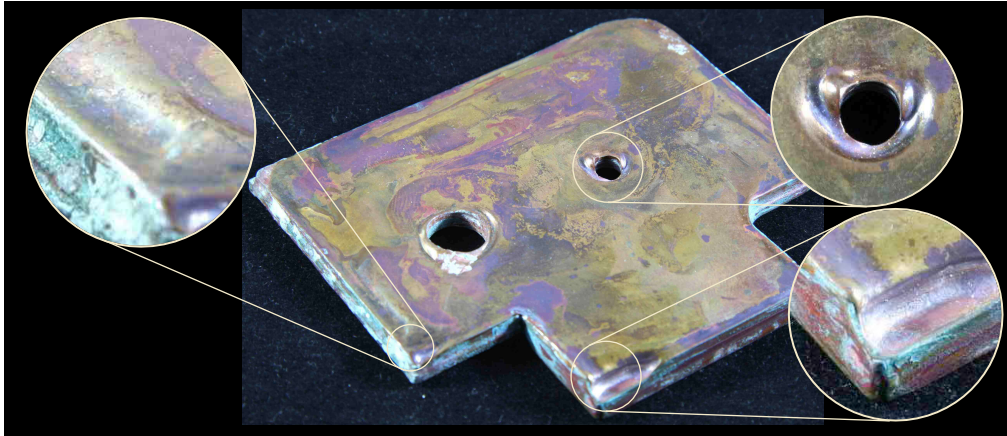


Bild 5-4: Mögliche Fehlstellen beim Einsatz von Blenden

Die beiden rechten Detailansichten zeigen Einfallstellen in zwei unterschiedlichen Bereichen. Einerseits ist dieses Phänomen um die Bohrungen zu sehen. Dort liegen sie als nicht vollständig geschlossene, ringförmige Vertiefung vor. Zudem sind Einfallstellen im Randbereich der 90°-Ecken mit nahezu unbeschichteten Bereichen zu erkennen. Die linke Detailansicht zeigt eine Erhöhung des abgeschiedenen Materials. Im Randbereich liegt eine reguläre Abscheidung vor, gefolgt von einer Art Welle mit anschließendem kleinen Tal. Diese Erhebung ist fast über die gesamte Breite der linken Seite ausgeprägt. Weiter sind an einigen Bauteilen Kupferabscheidungen von der Grundplatte entlang der Blendenwand hochgewachsen. Auch entlang der Zylinder, die zum Verschließen der Bohrungen genutzt werden, tritt derartiges Wachstum teilweise auf. Das Problem einer solchen inhomogenen Abscheidung ist die dadurch steigende Galvanisierungsdauer. Während einige Bereiche bereits eine gewünschte Abscheidungsstärke erreicht haben, ist die Beschichtung durch die Fehlstellen an anderen Stellen noch deutlich zu flach. Daraus folgt neben der längeren Prozesszeit und dem erhöhten Materialverbrauch ebenfalls ein größerer Nachbehandlungsbedarf, wenn eine plane Oberfläche gefordert ist. Um nun eine homogene Abscheidung zu erhalten, sind die Blenden entsprechend des zu beschichtenden Bauteils auszuliegen. Durch eine Kombination aus Simulation und praktischem Versuch soll dazu eine Vorgehensweise erarbeitet und das generelle Verständnis der Wirkung von Blendeneinheiten dargestellt werden. Im Fokus liegen dabei demnach die an der Berandung hochwachsenden Abscheidungen, die Einfallstellen und die wellenartigen Erhöhungen.

Die unterschiedlichen Abscheidungshöhen der aus den Versuchen stammenden Kupferplatten werden zur Sicherung des optischen Eindrucks mit dem nach DIN EN ISO 10360-1 als portalweise klassifizierten Koordinatenmessgerät Metris C3 V ermittelt. Dabei ist eine Genauigkeit von 2,4 µm erreichbar. Ein über drei Haupt- und zwei Hilfsachsen bewegbarer Taster meldet bei Berührung des Messkopfes mit einer

Oberfläche die aktuelle Position mit einer Genauigkeit von $0,5\text{ }\mu\text{m}$ an die Betriebssoftware. [225] [226] Der Messaufbau ist in Bild 5-5 dargestellt.

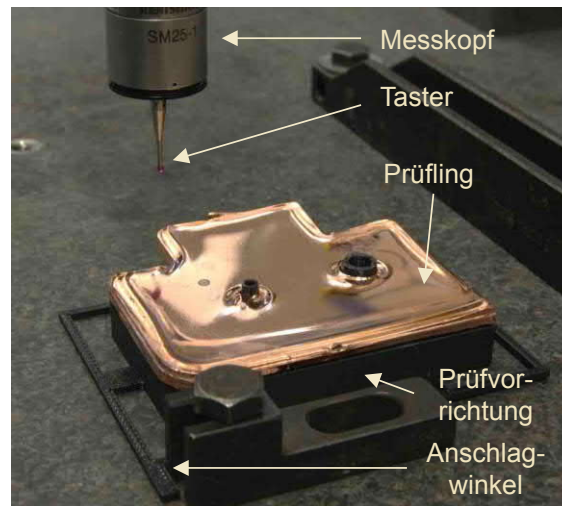


Bild 5-5: Messaufbau zur Überprüfung der Abscheidungshöhe

Die galvanisch auf Basis der Kupferplatten hergestellten Bauteile werden zur Vermessung auf einer Prüfvorrichtung positioniert, die der Grundgeometrie der Kupferplatte entspricht und sie somit in allen Ebenen fixiert. Das Messprogramm beinhaltet 400 Messpunkte, wodurch ein relativ genaues Bild der Abscheidungshöhe geschaffen wird. Mit der Tastspitze, deren Radius 1 mm beträgt, sind auch kleine Einfallstellen zu ertasten. Die Auswertung erfolgt graphisch durch eine übertriebene Darstellung der Abweichung der z-Höhe von dem gemittelten z-Wert.

Für die Simulation des Prozesses kommt das FEM-Simulationsprogramm Comsol Multiphysics (kurz: Comsol) in der Version 4.3.0.151 zum Einsatz. Es ermöglicht den Umgang mit komplexen physikalischen Systemen, indem jeder physikalische Teileffekt von einem eigenen Physikmodul simuliert wird. Programmintern erfolgt mithilfe der einzelnen Ergebnisse die Analyse des Gesamtsystems. [227] Die Software soll in diesem Anwendungsfall dazu dienen, die Auswirkungen auf die Abscheidungsgeometrie nachvollziehen zu können. Eine quantitative Analyse wird dabei aufgrund der vielen weiteren Einflüsse nicht vorgenommen. Mit dem statischen EC-Modul (electric currents) kann der Verlauf der Feldlinien zwischen zwei Potentialen durch ein definiertes Medium berechnet und auf dieser Grundlage verschiedene elektrische Kenngrößen, wie die Strom- oder Spannungsdichte abgeleitet werden. Das Einlesen der Probekörper erfolgt über einfachen Import des CAD-Modells. Die Abmessungen des Beckens können über einen Quader definiert werden. Relevant für die Simulation des Verhaltens ist nur die elektrische Leitfähigkeit. Folgende Werte sind den einzelnen Elementen zugeteilt.

- Kupfer: $59,5 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ [228]
- ABS: $1 \cdot 10^{-16} \frac{\text{S}}{\text{m}}$ [147]
- Elektrolyt: $3 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ [105]

Als elektrisches Potential, also Anode im Fall der Galvanik, wird die Fläche des Elektrolyt-Quaders gewählt, die der Kupferplatte in der Simulation gegenüber liegt. Die Einstellung der Höhe des Potentials erfolgt auf 1 V. Dies entspricht nicht dem Anwendungsfall [105], ist für die gewünschte qualitative Beurteilung der Unterschiede allerdings nicht von Bedeutung. Der Diffusions- bzw. Polarisationswiderstand auf der Kathode wird durch einen Flächenbelag auf der Kupferplatte mit einer Dicke von 0,5 mm und einem Widerstand von 1 Ωm simuliert.

Ein Vergleich des Ergebnisses der realen Galvanisierung (a) mit der simulierten Stromdichte ergibt zum Teil gute Übereinstimmungen. Die Simulation der Verteilung auf der Kupferplatte (b) sowie die Stromdichte in dem mit Rot gekennzeichneten Querschnitt (c) ist in Bild 5-6 dargestellt.

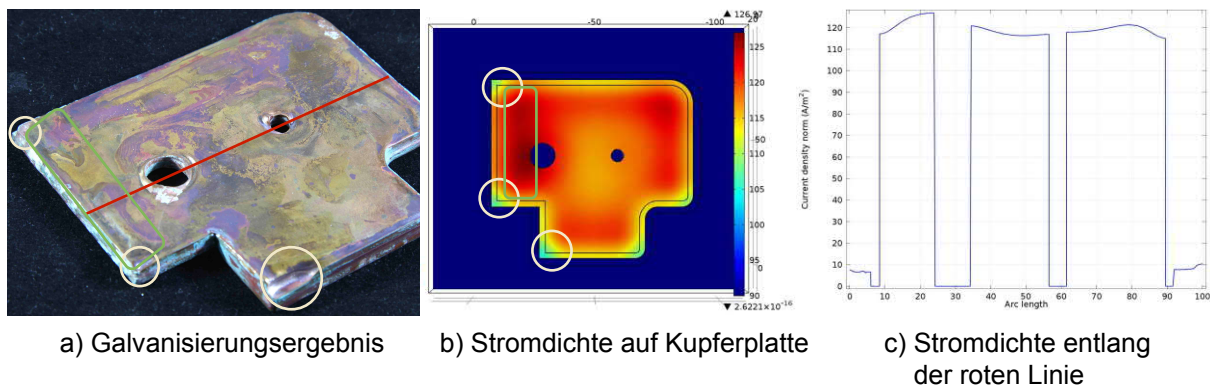


Bild 5-6: Vergleich der galvanischen Fehlstellen mit der Simulation

Die Einfallstellen in den Ecken werden in der Simulation durch eine reduzierte Stromdichte abgebildet. Sogar die Intensität spiegelt sich in der Realität wieder. Die untere linke Ecke zeigt die geringste Stromdichte in der Simulation sowie die tiefste Einfallstelle am Bauteil. Die wellenartige Erhöhung ist ebenfalls deutlich als dunkelroter Bereich zu erkennen. Dieser befindet sich allerdings im Vergleich mit der realen Abscheidung weiter zur Bohrung verschoben. Im hellorange dargestellten mittleren Bereich kann durch die Messung mithilfe des Koordinatenmessgerätes ebenfalls eine im Verhältnis geringe Schichtstärke ermittelt werden. Kein direkter Zusammenhang kann an den Bohrungen erfolgen. Im rechts dargestellten Line Graph ist mit den Nullstellen von links nach rechts zunächst die linke Blendenwand, anschließend die große und kleine Bohrung und letztlich die rechte Blendenwand zu sehen. Unmittel-

bar an den Bohrungen sind demnach keine geringen Stromdichtewerte simuliert, was gegen die am realen Bauteil entstehenden Einfallstellen spricht. Die Übereinstimmungen zeigen, dass die Simulation Hinweise auf das reale Verhalten liefern kann, jedoch weitere Faktoren einen Einfluss haben müssen. Im weiteren Verlauf wird daher neben der simulierten Stromdichteverteilung auch der Einfluss der Konvektion, also der Fluidbewegung mit eventueller Verarmung des Elektrolyten betrachtet.

5.2.1 Auswirkung der Blenden auf die Stromdichteverteilung

Unter der Annahme, dass die Blendengeometrie alleiniger Einflussfaktor für die Stromdichteverteilung auf der Kupferoberfläche ist, soll anhand der in Bild 5-7 a) dargestellten Blende untersucht werden, ob das Abscheidungsverhalten gezielt gesteuert werden kann. Die Blende deckt große Teile der Kupferplatte ab und hat in Randnähe sowie um die Bohrungen entsprechende Spalte in den Bereichen, in denen bei der offenen Blende Einfallstellen entstehen.

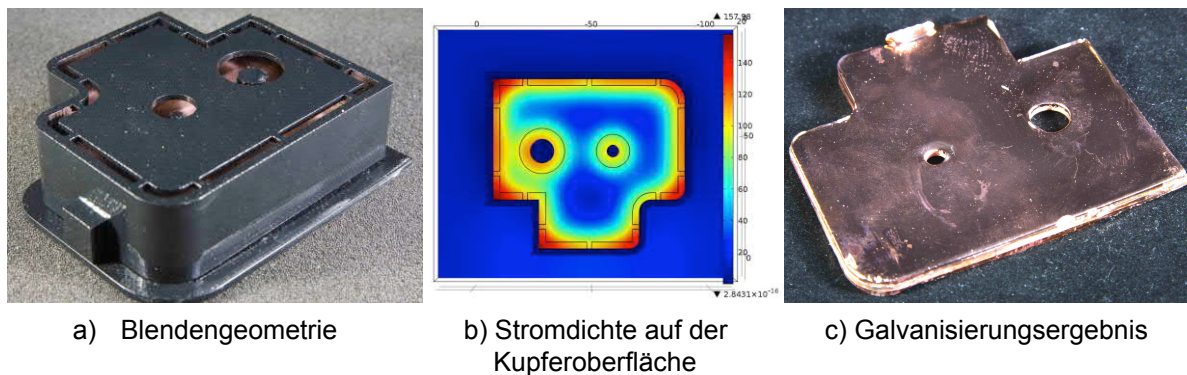


Bild 5-7: Blende zur Konzentration der Stromdichte in Randbereichen

Die in der Mitte dargestellte Stromdichteverteilung (b) zeigt deutlich, dass in den Ecken Maxima vorherrschen, während bei der vorher gezeigten offenen Blende an diesen Stellen Minima zu lokalisieren sind. Ebenfalls um die Bohrungen ist die Stromdichte verhältnismäßig hoch. Das Ergebnis der Galvanisierung ist in Bild 5-7 c) zu sehen. Es zeigt sich ein sehr homogenes Abscheidungsverhalten. Weder Einfallstellen noch Erhöhungen sind dabei entstanden. Auch die Koordinatenmessung unterstützt den guten optischen Eindruck des Bauteils. Um die Bohrungen ist noch eine leichte Unebenheit zu erkennen, die nicht mit der Simulation zu erklären ist.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass es durch geeignete Blendenkonstruktionen möglich ist, das Galvanisierungsergebnis zu beeinflussen. Bei bekannten Fehlstellen unter Verwendung einer offenen Blende kann durch entsprechende Iterationsschritte in der Simulation ein wesentlich besseres Ergebnis erzielt werden. Ein weiterer Aspekt, der durch die Blende möglicherweise erzeugt wird, ist die Änderung

der Konvektion auf der Kupferoberfläche. Zudem ist die vorherige Entstehung der wellenartigen Erhöhung bzw. deren Verschiebung nicht geklärt. Daher folgen Betrachtungen zum Einfluss der Konvektion auf das Abscheidungsverhalten.

5.2.2 Beeinflussung der Konvektion durch Blenden- und Bauteilgeometrie

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten werden die Blenden so ins Galvanikbad gehangen, dass eine seitliche Anströmung stattfindet. Um das Strömungsverhalten innerhalb der Blenden bzw. auf den Kupferoberflächen einzuschätzen, kann auf grundlegende Theorien der Fluidodynamik zurückgegriffen werden. Stromlinien folgen beispielsweise keinen spitzen Winkeln. Wie Bild 5-8 a) darstellt, können so strömungsberuhigte Bereiche entstehen. Des weiteren fließen Strömungen parallel zu Oberflächen, solange sie plan sind oder große Krümmungsradien aufweisen. Abrupte Änderungen können zu Ablösungen und Wirbeln führen. Dieses Prinzip ist in Bild 5-8 b) zu sehen. [229] [230]

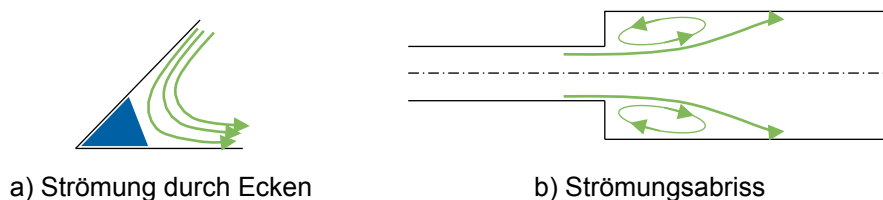


Bild 5-8: Grundlegende Strömungsprinzipien [229]

Die dargestellten Grundlagen lassen in Verbindung mit der seitlichen Anströmung auf mangelnde Fluidbewegung und somit eine stark reduzierte Konvektion in einigen Bereichen schließen. Unmittelbar hinter der angeströmten Blendenwand ist beispielsweise von einem solchen Bereich auszugehen. Ebenso wird die Strömung um die Zylinder, welche die Bohrungen schließen, gestört sein. Zuletzt kann in den Ecken in Abhängigkeit der Anströmrichtung von reduzierter Konvektion ausgegangen werden. Mögliche Strömungsbilder sind in Bild 5-9 zu sehen.

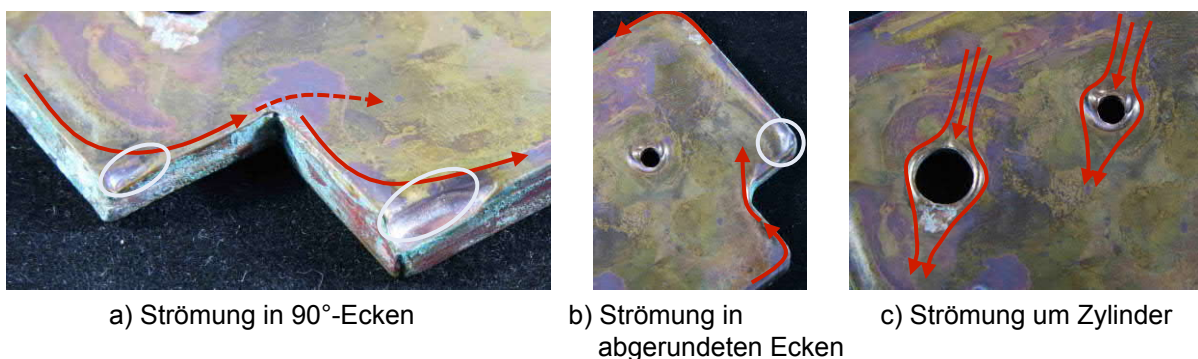


Bild 5-9: Mögliche Strömungsbilder

Dabei zeigt Bild a) eine unzureichende Strömung in den Ecken, kombiniert mit einem möglichen Strömungsabriss an der Kante, wodurch die Fehlstelle in der zweiten Ecke noch größer ist. In b) ist der mögliche gute Strömungsverlauf in den abgerundeten Ecken zu sehen, wobei die Ablösung wieder für eine Fehlstelle sorgen kann. Bild c) zeigt Strömungen um die Zylinder, die möglicherweise zu einer Verarmung des Elektrolyten führen.

Um die Auswirkung der Strömung bzw. der damit in Verbindung stehenden Verarmung zu simulieren, wird dem Elektrolyten in den Bereichen geringer Strömung eine geringere Leitfähigkeit zugeordnet. Um die auch bei kaum vorhandener Strömung vorliegende Brown'sche Molekularbewegung mit einzubeziehen, erfolgt die Simulation eines elektrischen Leitwertes, der sich mit zunehmendem Abstand von der Schnittstelle zwischen Blendenwand bzw. -zylinder und der Kathode erhöht. In Bild 5-10 (a und b) ist jeweils in der linken Abbildung die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten und rechts die daraus resultierende Stromdichteverteilung auf der Kupferplatte zu sehen.

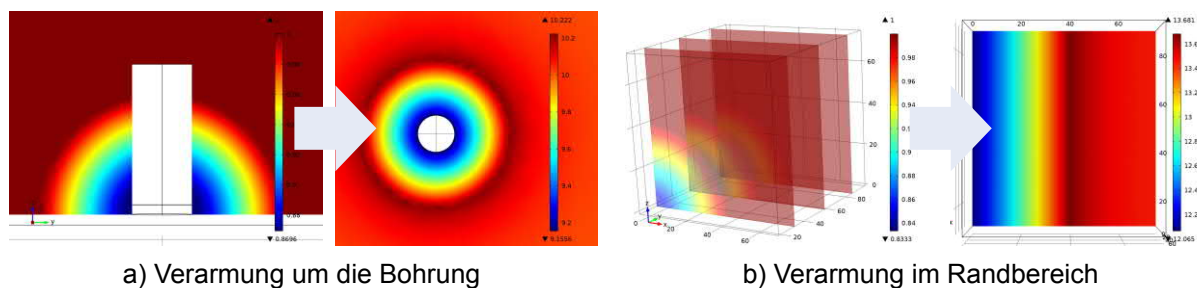


Bild 5-10: Simulation der Stromdichteverteilung durch Elektrolytverarmung

Wie erwartet, ist die Stromdichte proportional zur lokalen Leitfähigkeit. Dabei fällt auf, dass unmittelbar nach dem Erreichen der Stromdichte außerhalb der Einwirkzone eine Überhöhung simuliert wird. Diese zeigt sich in den Abbildungen durch den dunkelrot gefärbten Kreis bzw. die dunkelrote Linie. Die Erklärung liegt in der Umlenkung der Feldlinien, die den Bereich der geringen Elektrolytleitfähigkeit umgehen und vermehrt im daran angrenzenden Bereich auftreten. An den Zylindern kann ein direkter Zusammenhang mit den realen Bauteilen gezogen werden. An der strömungszugewandten Seite ist eine homogene Abscheidung zu sehen, während an den anderen Bereichen Einfallstellen mit anschließender Erhöhung der Kupferabscheidung deutlich sind. Die wellenartige Erhöhung hinter der angeströmten Blendenwand ist ebenfalls mit der Simulation zu erklären. Diese Fehlstelle zeigt sich zwar auch bei Simulation einer offenen Blende mit homogener Leitfähigkeit, jedoch liegt sie dabei, wie beschrieben, zu weit in der Bauteilmitte. Insgesamt kann der Konvektion auf Basis der Simulationsergebnisse eine wesentliche Rolle zugesprochen werden. Dennoch ist dieses Phänomen nie alleine zu betrachten, da auch der Blendeneinfluss auf die

Stromdichte in der Simulation und im Versuch zu erkennen ist. Demnach sind beide Faktoren bei der Auslegung von großer Relevanz und können zur Beeinflussung des Abscheidungsergebnisses genutzt werden. Um den Einfluss der Konvektion durch einen praktischen Versuch zu untermauern, erfolgt die Galvanisierung eines Probekörpers mit offener Blende, wobei mit einer zusätzlichen Umwälzpumpe eine starke, frontale Anströmung der Kathodenoberfläche stattfindet. Neben der verwendeten Blende (a) ist in Bild 5-11 das Ergebnis der Galvanisierung (b) sowie eine Detailaufnahme (c) zu sehen.

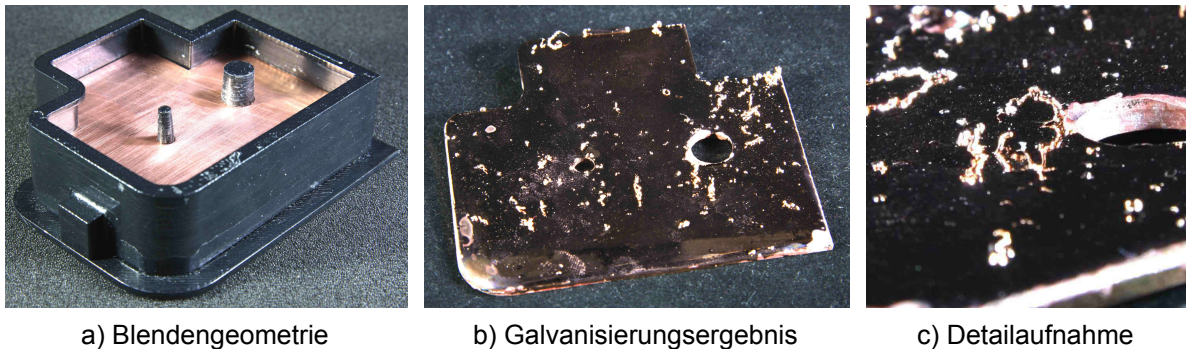


Bild 5-11: Abscheidung bei voller Anströmung

Zunächst fallen sofort die kleinen, körnigen Kupferabscheidungen auf. Die Entstehung dieser Fehlstellen ist auf die Anströmung zurückzuführen. Die verwendete Umwälzpumpe nimmt im Elektrolyt schwebende Kupferpartikel auf und befördert diese auf die Kathodenoberfläche. Bleibt ein solcher Partikel auf der Oberfläche haften, stellt er eine Erhöhung der Bauteiloberfläche dar, auf der sich teilweise die Feldlinien konzentrieren. Die Pumpe hat einen Filter von 5 μm Maschengröße. Wird diese reduziert, kann das Problem behoben werden. [105] Außer dieser Fehlstellen liegt eine sehr homogene Abscheidung vor, die weder die bekannten Einfallstellen noch Erhöhungen oder Strömungseffekte aufzeigt. Mit einer ausreichenden Strömung und homogener Konvektion ist demnach eine gute Abscheidungsqualität bei der Verwendung der beschriebenen Blenden zu erreichen, was die Theorie der Konvektion als weitere Ursache für Fehlstellen bekräftigt.

In einer letzten Testblende soll überprüft werden, ob neben der Strömungserhöhung zur Homogenisierung der Konvektion auch eine Reduzierung durch konstruktive Umgestaltung möglich ist und zu einer gleichmäßigeren Abscheidung führt. Um den Feldlinien genügend Raum für eine homogene Verteilung auf der Kathodenfläche zu lassen und eine reduzierte Strömung vorliegen zu haben, erfolgt die Konstruktion in Form eines Lochmusters. Die Anströmung erfolgt wie in den ersten Versuchen von der Seite. Während die Löcher dabei möglichst wenig Strömung ins Blendeninnere lassen sollen, ist trotzdem die Möglichkeit des Stofftransportes gegeben. Die Blende

(a), die zugehörige Simulation (b) sowie das Ergebnis der Galvanisierung (c) ist in Bild 5-12 dargestellt.

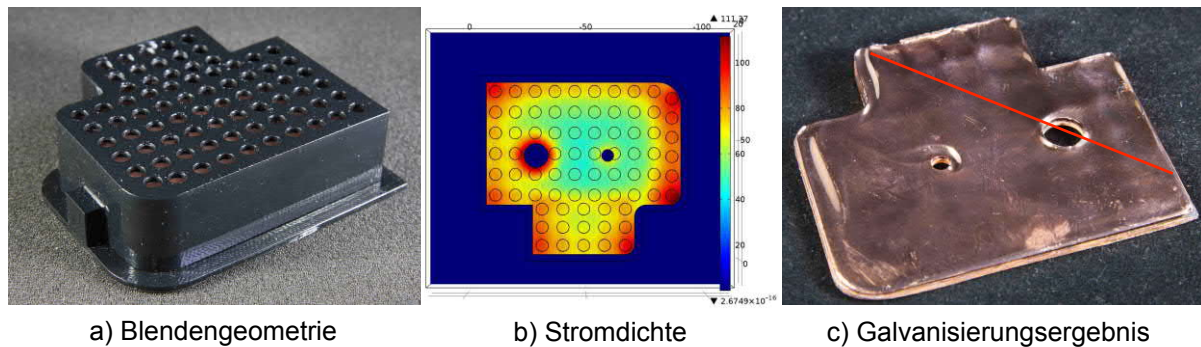


Bild 5-12: Blende mit Lochgitter zur Konvektionsunterdrückung

Trotz der deutlichen Farbunterschiede der einzelnen Bereiche der Simulation ist die Stromdichteverteilung auf der Kupferplatte verhältnismäßig homogen. Ähnlich zur Blende mit den Spalten in den Randbereichen gibt es Maxima in den Ecken sowie um die Bohrungen, vor allem um die größere. Bei Betrachtung des Probekörpers ist eine deutliche Zweiteilung zu erkennen. Unterhalb der in rot gekennzeichneten Trennung sind deutliche, wellenartige Erhöhungen im Randbereich auszumachen. Oberhalb der Linie hingegen zeigt sich eine wabenartige Struktur. Eine Einfallstelle befindet sich um die kleine Bohrung. Die große Bohrung zeigt eher eine geringfügige Erhöhung. Die optischen Eindrücke werden durch die Messung mithilfe der Koordinatenmessung bestätigt. Der Vergleich mit der Simulation zeigt für den oberen Bereich, dass die Knotenpunkte der Waben jeweils bei den erhöhten Stromdichten genau unter den jeweiligen Blendenöffnungen liegen. Auch die leichte Erhöhung an der großen Bohrung korreliert mit der Simulation. Unterhalb der roten Linie sind die Unebenheiten nicht mit der Simulation zu klären. Hier kann eher von Strömungseinflüssen ausgegangen werden. Um den kleinen Zapfen sowie an den Randbereichen entstehen die bekannten Abscheidungen. Die Vermutung liegt nahe, dass das konstruierte Lochmuster nicht zu einer ausreichenden Strömungsberuhigung führt. Demnach sind die Abschattungseffekte auf der Kupferoberfläche von deutlich stärkerem Einfluss, je weniger Fluidströmung herrscht. Als Schlussfolgerung für die Auslegung kann gezogen werden, dass auch eine geringe Konvektion homogene Abscheidungsergebnisse begünstigen kann, sofern die simulierte Stromdichteverteilung für die Blende ebenfalls homogen ist.

Neben den gezeigten Einflussfaktoren Blendegeometrie und Konvektion sind weitere Effekte für eine homogene Abscheidung verantwortlich, die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden können. So führen beispielsweise kleinste Erhöhungen, entweder durch vorherige Unebenheiten oder durch leichte Stromdichteun-

terschiede auf der Oberfläche dazu, dass sich die Feldlinien, also die Stromdichte an diesen Punkten ähnlich zu Bauteilkanten sammeln. Dieser Effekt ist mit einem rollenden Schneeball zu vergleichen, der sich, einmal angestoßen, selbstständig mit fortwährendem Prozess vergrößert. Damit können beispielsweise Gratbildungen an Bauteilkanten innerhalb der Blende erklärt werden, die teilweise auftreten. Noch so leichte Erhöhungen führen in diesen Bereichen mit der Zeit zu immer stärkerer Konzentration der Stromdichte. Auch ohne diese Effekte oder den Einfluss des Elektrolyten weiter zu betrachten, sind auf Basis der durchgeführten Versuche folgende Empfehlungen für den Einsatz solcher Blenden zu formulieren. Aufgrund der besten Resultate durch eine starke und gleichmäßige Konvektion auf der Kathodenoberfläche sollte darauf der Fokus gesetzt werden. Zu achten ist auf einen ausreichend feinmaschigen Filter zur Reduzierung bzw. Vermeidung der Kupfererhöhungen. Erfolgt die Galvanisierung in einem durch weitere Bauteile besetzten Becken, in dem die Anpassung der Strömung in diesem Ausmaß nicht möglich ist, kann durch eine weitestgehend geschlossene Blende die Strömung soweit reduziert werden, dass auch dieser Ansatz für eine homogenere Abscheidung sorgt. Auf Basis von Simulationen ist eine Geometrie zu ermitteln, die eine möglichst homogene Stromdichteverteilung bewirkt. Sollte eine Simulation nicht durchführbar sein oder die erstellte Blende keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern, kann auf Basis des praktischen Versuchs eine Blende erarbeitet werden, deren offene Bereiche über den im Versuch ermittelten Einfallstellen liegen. Die Ergebnisse zeigen insgesamt gute Möglichkeiten, um Einfluss auf die Abscheidungsqualität zu nehmen. Dennoch ist großes Potential in weiteren Versuchen zu sehen, die zu einer noch besseren Vorhersagbarkeit und Auslegbarkeit von Blenden führen können.

5.3 Applikation der Galvanoformung auf Kupfer-Wachsbasis

Die mithilfe des FLM hergestellten Blenden sollen in einer Verfahrenskombination aus Multi-Jet Modeling (MJM), der Galvanik und der spanenden Nachbearbeitung zum Einsatz kommen. Dabei agiert das additive Fertigungsverfahren, in diesem Fall das MJM wieder als Mittel zur Herstellung eines Transfermodells, wie es in Bild 4-1 dargestellt ist. Das MJM ist durch das lange Zeit verwendete, wachsähnliche Material häufig in indirekten Prozessen zum Einsatz gekommen. Dabei beschränkte sich die Verbreitung hauptsächlich auf den Feinguss. Die Galvanoformung fand auch in diesem Fall bislang kaum Beachtung und wurde lediglich zur Oberflächenveredelung eingesetzt. [231] [124] Die Ausarbeitung der Verfahrenskombination erfolgte vor dem Hintergrund, dass konventionell hergestellte Komponenten in der Brennstoffzelle zu Abdichtungsproblemen führen können, die mithilfe der galvanischen Herstellung eliminiert werden können. So kann eine Substituierung der bisherigen Herstellung aus

der Innengeometrie existenziell (b). Diese werden den neuen Möglichkeiten der Kombination entsprechend angepasst und sorgen so für optimale Ergebnisse sowohl im Einsatz der späteren Bauteile als auch für eine problemlose Herstellung. So sind beispielsweise sehr komplexe und filigrane Strukturen möglich. C zeigt das Ergebnis des ersten Herstellungsschrittes. Mithilfe des MJM ist ein Wachsmodell unmittelbar auf eine endkonturnahe Kupferplatte zu bauen. Je stärker dabei die Ähnlichkeit des Kupferplattenquerschnittes mit der des Endproduktes ist, desto geringer fällt der Nachbearbeitungsaufwand aus. Der nächste Schritt ist die Herstellung einer angepassten Galvanikblende durch das FLM (d). Auch hier ist Zweck des Einsatzes ein möglichst geringer Fräseinsatz. Dies reduziert zum Einen die Kosten der Nachbearbeitung, zum Anderen auch die Zeit- und Materialaufwendungen der Galvanisierung. Der folgende Prozess (e) wird solange ausgeführt, bis eine ausreichende Schichtstärke erreicht ist. Diese hängt in erster Linie von der Geometrie der inneren Kanäle ab. Neben der Umschließung der Wachsstrukturen ist auch darauf zu achten, dass ausreichend Material für die nachfolgende spanenden Bearbeitung (f) vorhanden ist und eine geschlossene Kupferoberfläche entsteht. Wichtig ist dabei, dass das Wachs vor der spanenden Bearbeitung ausgeschmolzen wird. Verbleibt das Wachs in den Kanälen, kann die Ausdehnung durch den Wärmeeinfluss des Fräsens zur Beschädigung des Bauteils führen. G zeigt das fertig bearbeitete Bauteil. Abschließend erfolgt je nach Bauteil das Anbringen von Anschlussstücken, indem Gewinde in die Anschlussstellen geschnitten werden. [199] [232] [233] [236]

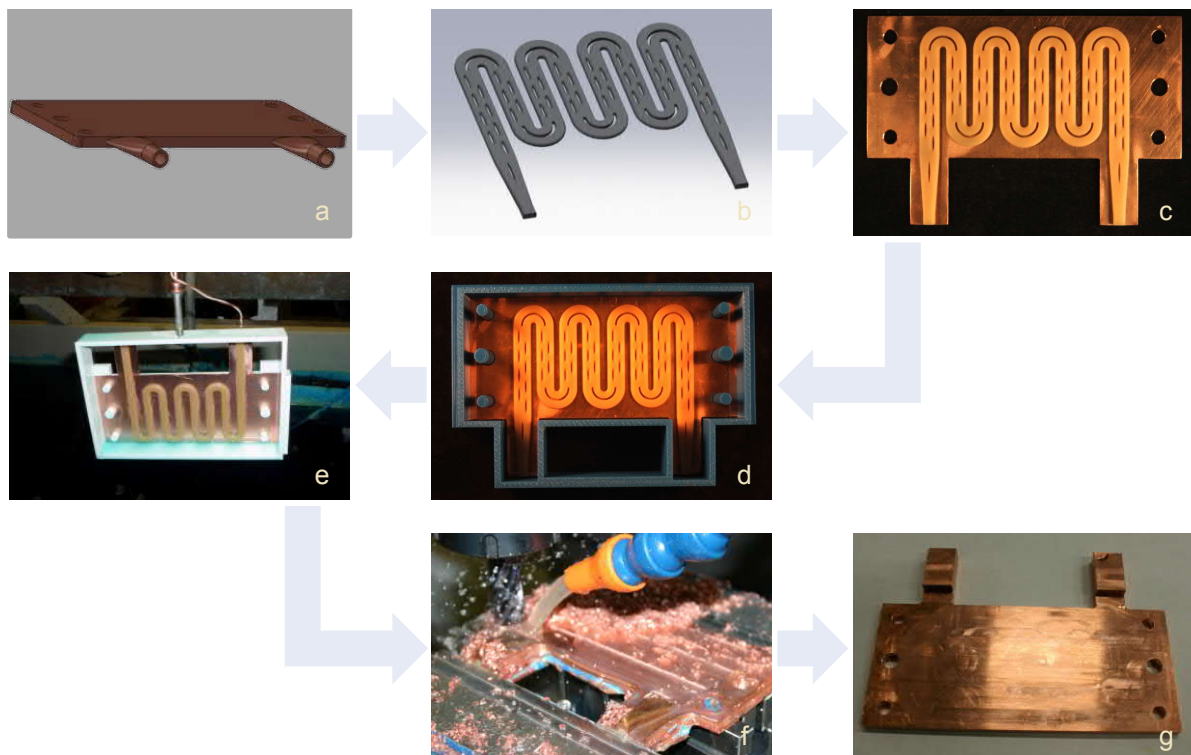


Bild 5-14: Darstellung der Verfahrenskombination

5.3.3 Anpassung des MJM

Der wesentliche Unterschied zwischen der eigentlichen Anwendung des zum Einsatz kommenden Thermojets der Firma 3D Systems und der Anwendung in der Verfahrenskombination besteht in dem Verzicht auf Supportstrukturen. Diese werden beim MJM genau wie bei anderen additiven Fertigungsverfahren, die durch Materialextrusion arbeiten, zur Stützung von Überhängen und zum Vereinfachen der Trennung des Bauteils von der Bauplattform verwendet. Die in diesem Fall nadelförmige Struktur, die von der Anlagensoftware vor jedem Prozess automatisch digital generiert wird, gehört nicht zur gewünschten Bauteilgeometrie und darf demnach nicht mit auf der Kupferplatte erzeugt werden. Dieser Unterschied ist in Bild 5-15 nochmals dargestellt und zeigt deutlich, dass lediglich der Ersatz der Supportstruktur durch die vorgefertigte Kupferplatte vorzunehmen ist. [199] [232] [233] [236]

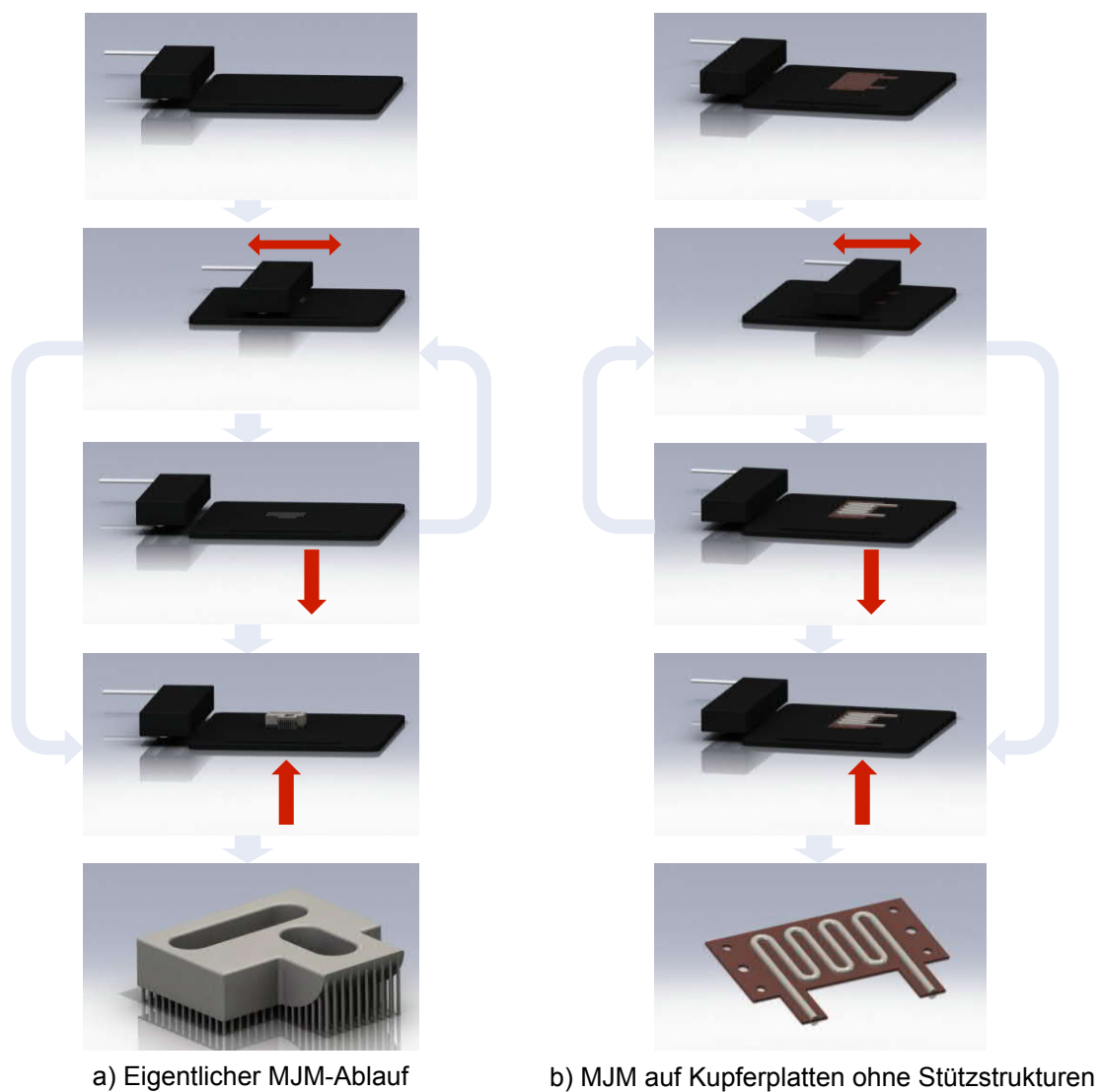


Bild 5-15: Anpassung des MJM an den Anwendungsfall

Zur Realisierung ist zunächst zu ermitteln, wie viele Schichten Supportmaterial erzeugt werden. Durch Betrachtung der Logdateien und der Bauteile ist Schicht 125 als erste Bauteilschicht festzuhalten. Durch entsprechende Einstellungen der Wartungssoftware des Thermojets kann eine beliebige Schicht als Startschicht definiert und somit alle vorherigen Schichten übersprungen werden. So ist die Herstellung ohne Supportstrukturen möglich. [199] [232] [233] [236]

5.3.4 Haftungsproblematik

Durch den Wegfall der Supportstrukturen kommt es zu Haftungsproblemen zwischen Wachs und Kupfer. Um diese zu reduzieren, erfolgt zunächst der Versuch der mechanischen Vorbehandlung der Kupferplatten. Durch verschiedene Verfahren zur Glättung, wie beispielsweise das Elektro- oder Plasmapolieren oder zur Aufrauhung (Sand- oder Korundstrahlen) können keine Erfolge erzielt werden. Auch bei veränderten Oberflächen verziehen sich die Bauteile derart stark, dass sich Randbereiche vom Kupfer lösen, wie es in Bild 5-16 zu sehen ist. Durch die stark glänzende Fläche des elektropolierten Bauteils wirkt das Bild, als sei eine Haftung vorhanden, am realen Bauteil ist dieses jedoch nicht der Fall.

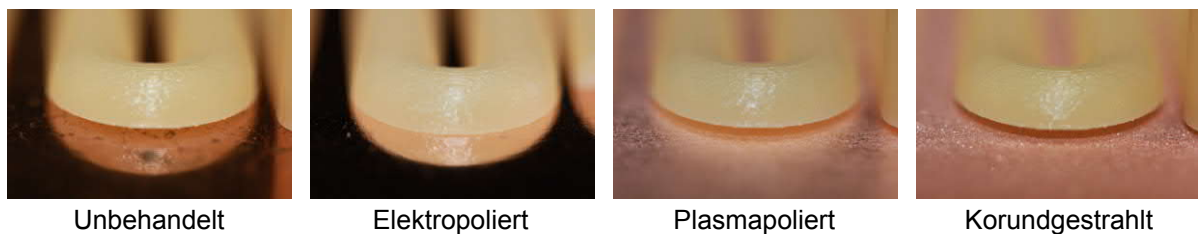


Bild 5-16: Haftungsproblematik der Wachsmodelle auf Kupferplatten

Demnach ist der mangelnden Haftung nicht durch die Verstärkung der Adhäsion sondern durch Reduzierung des Verzuges entgegenzuwirken. In Vorversuchen wurde die Temperatur der Wachsteile während des Bauprozesses aufgezeichnet. Sowohl an der Bauteilunterseite, also im Supportbereich, als auch an der Bauteiloberseite unmittelbar nach Bauende erfolgte die Temperaturaufzeichnung. Im Supportbereich kühlt die Temperatur während des Bauprozesses sehr langsam von ca. 60 auf ca. 55 °C ab. Das Bauteil hat im Randbereich mit Fertigstellung des Bauprozesses noch eine Temperatur von etwa 60 °C, kühlt aber sehr schnell auf die Temperatur des Supportbereiches ab. Im Anschluss kühlen beide Bereiche etwa gleich schnell ab. [224] Um nun die Differenz zwischen den frisch aufgetragenen Schichten und den darunterliegenden bzw. den Supportstrukturen so gering wie möglich zu halten, erfolgt das Einlegen einer vorgewärmten Kupferplatte und nicht wie bisher einer kalten. Versuche stellen dabei eine Temperatur von 55 °C als ideal heraus. Somit ist der Temperaturgradient zwischen frisch aufgetragenem Wachs und neu eingelegter Plat-

te minimal und ein zu schnelles Abkühlen und der damit verbundene thermisch induzierte Verzug kann verhindert werden. Bei der herkömmlichen Verwendung des Thermojets sorgen die von Baubeginn an eingelegte und dadurch vorgewärmte Bauplattform sowie die im Normalfall hergestellten Supportstrukturen für eine ausreichend langsame Abkühlung. Die Supportstrukturen reduzieren die Wärmeabfuhr durch die geringere Kontaktfläche während ohne diese das gesamte Bauteil auf der Kupferplatte aufliegt. [199] Bild 5-17 (a und b) zeigt auf der linken Seite einen Testkörper mit ausreichender Haftung und auf der rechten Seite den Außenbereich der im weiteren Verlauf vorgestellten Reformerstruktur.

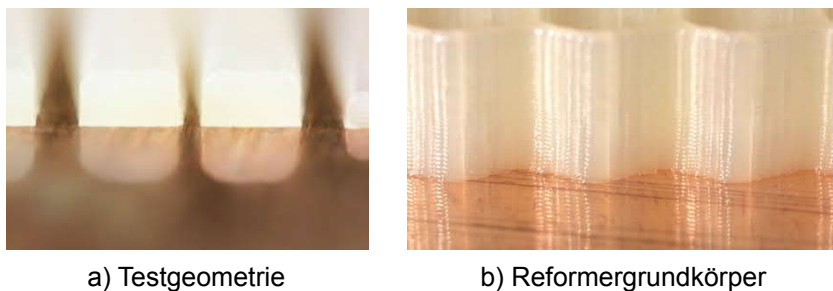


Bild 5-17: Ausreichende Haftung durch Wärmever- und -nachbehandlung

5.3.5 Galvanik der Kupfer-Wachsmodelle

Bevor es zur Galvanisierung der vorhandenen Kupfer-Wachsmodelle kommt, muss eine Vorbereitung des Kupfers erfolgen, da nur auf metallisch reinen, oxidfreien Flächen haftend galvanisiert werden kann. [237] Dazu kommt in diesem Anwendungsfall nur das nach DIN 8592 dem chemischen Abtragen zugeordnete Beizen in Frage [238]. Der Prozess ist zwar abtragend, greift aber weder das Wachs noch die Haftung zwischen Wachs und Kupfer an. Andere, mechanische Reinigungsprozesse, wie beispielsweise das Bürsten oder verschiedene Arten des Reinigungsstrahlens kommen aufgrund der geringen Adhäsionskräfte nicht in Frage. Obwohl sie besonders kontrolliert und effektiv abläuft, kann die Dampfentfettung nicht eingesetzt werden. Die zu reinigenden Bauteile müssten auf die Siedetemperatur des zur Reinigung eingesetzten Lösemittels gebracht werden, was nicht nur die Haftung, sondern auch die Formstabilität des Wachses gefährden würde. [239] Eine entsprechende Reinigung des Kupfers vor dem additiven Aufbau des Wachses sowie möglichst wenig Kontakt danach sind trotz der Reinigung anzuraten.

Ausreichende Reinheit und die Adhäsion zwischen Kupfer und Wachs sind nicht die einzigen grundlegenden Voraussetzungen für eine erfolgreiche Galvanisierung. Die elektrochemische Beschichtung von Bauteilen kann nur auf elektrisch leitfähigem Ausgangsmaterial erfolgen. Bei Kupfer stellt dies kein Problem dar, jedoch bei den

additiv erzeugten Wachsaufbauten. Grundsätzlich sind hier drei Ansätze der Galvanisierung möglich:

1. Aktivieren der Wachsstruktur mithilfe eines Silbersprays vor der Galvanisierung
2. Galvanisierung ohne die Aktivierung und somit ausschließlich auf den Kupferflächen
3. Galvanisierung ohne Aktivierung und Zwischenschritt zur Aktivierung nach einer definierten Zeit

Aus den ersten beiden Ansätzen entstehen Einschränkungen hinsichtlich der Prozessqualität und -geschwindigkeit der Galvanisierung. Bild 5-18 zeigt die Auswirkungen der jeweiligen Vorgehensweise. Die von Beginn an aktivierten Flächen können dazu führen, dass die oberen Teile der Kanäle zusammenwachsen, bevor der Zwischenraum gänzlich gefüllt ist. Dadurch entstehen Kavitäten im Inneren des Bauteils. Bei Verzicht auf die Aktivierung kann ein Zusammenwachsen oberhalb der Kanäle ohne kompletten Kontakt zur Wachsstruktur auftreten. Beide Phänomene werden durch hohe Expositionsraten und größere Kanalquerschnitte verstärkt und sind in Bild 5-18 aufgrund der kleinen Testgeometrie nur gering ausgeprägt. [199] [232] [233] [236]



Bild 5-18: Leitende und nicht leitende Wachsstrukturen nach der Galvanisierung

Ein weiterer Nachteil von Methode eins, neben den notwendig, sehr geringen Expositionsraten, ist das sofortige Anwachsen von Kupfer auf den Wachskanälen. Es entsteht dadurch eine enorme Überhöhung. Diese wird durch den Effekt verstärkt, dass näher zur Anode ausgerichtete Bauteilsegmente zu höheren Wachstumsraten tendieren. Folge ist sowohl ein weit höherer Materialverbrauch in der Galvanik als auch eine Steigerung des Nachbearbeitungsaufwandes. Die durch Ansatz zwei entstehende Problematik soll an Bild 5-19 verdeutlicht werden. Neben den nicht beeinflussbaren Geometrieänderungen der entstehenden Kanäle wirkt sich das sehr späte Verbinden der Kupferabscheidungen auch hier sehr negativ auf die Prozesszeit, die Menge des eingesetzten Materials und die notwendige Nachbearbeitung aus. Die

lange Galvanisierungszeit führt zu einem viel höheren Anwachsen, als es für das Bauteil wirklich notwendig ist und selbst bei ausreichender Zeit kann nicht gewährleistet werden, dass die Kanäle nach dem Fräsen auf Endmaß geschlossen bleiben.

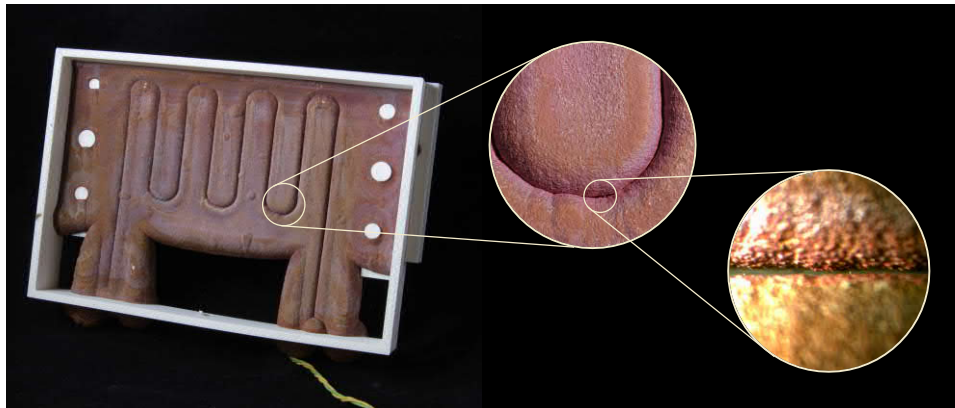


Bild 5-19: Galvanisierter Wärmetauscher ohne Aktivierung

Letztlich ist der dritte Ansatz aus prozesstechnischer und wirtschaftlicher Sicht trotz des Zwischenschrittes zu empfehlen. Wie in Bild 5-20 zu sehen ist, wird zunächst bis kurz unterhalb der Wachsstrukturhöhe galvanisiert. Es folgt die Aktivierung des nicht leitenden Materials und die Fortsetzung der Galvanisierung. So entstehen vollständig geschlossene Kupferteile mit möglichst geringer Überhöhung über den Wachsstrukturen.

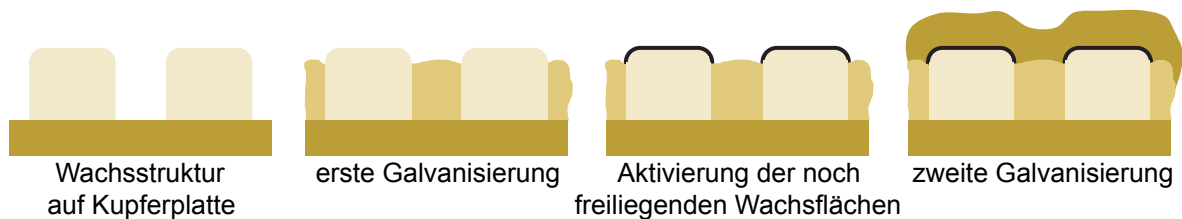


Bild 5-20: Vorgehen der verzögerten Aktivierung

Die bei der galvanischen Abscheidung erreichten Expositionsraten von 350 bis 700 μm pro Tag sind relativ gering, jedoch erreicht das abgeschiedene Kupfer annähernd die Materialeigenschaften von metallurgischem Kupfer. Einige wichtige Kennwerte sind im Folgenden aufgelistet [199]:

- Elektrische Leitfähigkeit: 58 MS/m
- Wärmeleitfähigkeit: 350 – 400 W/(m*K)
- Härte: 125 – 120 HV_{0,5}
- Zugfestigkeit R_m: 330 – 350 N/mm²
- Dehngrenze R_{p0,2}: 255 – 275 N/mm²
- Dehnung A₅: 25 – 30 %

Ein wesentlicher Vorteil der Verfahrenskombination ist der geringe Temperatureinfluss auf den Kupferwerkstoff. Der galvanische Prozess findet bei Raumtemperatur statt. Lediglich das Auslösen des Wachses erfordert das Erreichen des Schmelzbereiches, der im Fall des verwendeten Materials TJ88 zwischen 80 und 90 °C liegt [240], was bei Kupfer zu keinen Veränderungen der physikalischen Eigenschaften führt. Andere Möglichkeiten der Herstellung wie etwa Löten, Hochtemperaturlöten oder Schweißen erfordern weit höhere Temperaturen und beeinflussen somit die Eigenschaften des Kupfers. Entscheidender Vorteil bei der Anwendung der Prozesskette zur Herstellung von medienführenden Komponenten ist das schnelle Erreichen von vakuumdichten und sogar Ultrahochvakuum tauglichen Bauteilen. Die Erfahrung zeigt, dass bereits Abscheidungsstärken von 300 bis 500 µm zu Helium Leckageraten von $1 \cdot 10^{-9}$ mbar·l/s führen. Somit ist bei der Führung von flüssigen Medien mit sehr geringen Schichtstärken ein störungsfreier Betrieb sichergestellt, was zu erheblichen Material-, Größen- und Gewichtsersparnissen führt. [199]

5.3.6 Einsatz der FLM-Blenden

Für eine endkonturnahe Fertigung im Galvanikprozess kommen nachbehandelte Blendenmodelle bei der Herstellung der Brennstoffzellenkomponenten zum Einsatz. Bild 5-21 zeigt Blenden für Wärmetauscher und Reformereinheiten. Dabei ist zu sehen, dass ein klar definierter Bereich für die Abscheidung des Kupfers entsteht. Auch später notwendige Durchgangsbohrungen werden durch die Blende abgedeckt, was die Nachbearbeitung vereinfacht und für Fixpunkte bei der spanenden Bearbeitung sorgt. Generell sind die Grundlagen aus Kapitel 5.2 zu berücksichtigen.

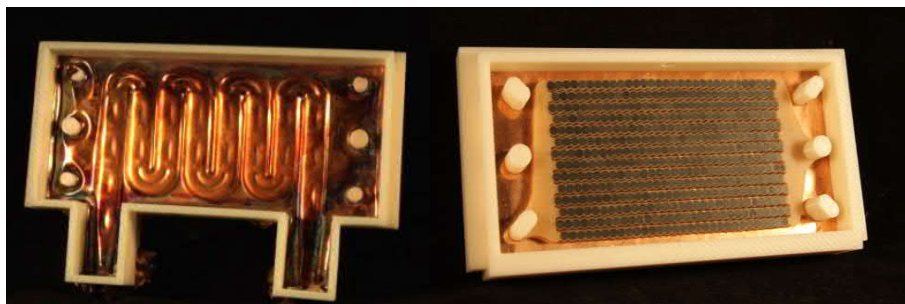


Bild 5-21: Blenden für Wärmetauscher und Reformier

5.3.7 Anwendungsbeispiele in der Brennstoffzellentechnik

Im Folgenden sollen die erprobten Möglichkeiten des Einsatzes der Prozesskette für die Herstellung von Brennstoffzellenkomponenten kurz dargestellt werden. Neben den relativ einfachen Geometrien der Wärmetauscher erfolgt die Herstellung von Reformern und mehrschichtigen Bauteilen.

Wärmetauscher

Für die Herstellung des Wärmetauschers ist zunächst der Querschnitt des medienführenden Kanals anzupassen. Bild 5-22 zeigt auf der linken Seite die ursprüngliche Geometrie, die durch das Fügen von zwei Kupferplatten mit je der Hälfte des Kanalquerschnittes zu realisieren ist. Durch die Überhänge erzeugt die Anlagensoftware Supportstrukturen, die nicht deaktiviert werden können, da sie ebenfalls nach der 125. Schicht vorhanden sind. Somit ist zunächst für eine überhangfreie Struktur zu sorgen. Mögliche Ansätze sind in der mittleren sowie in der rechten Abbildung dargestellt.

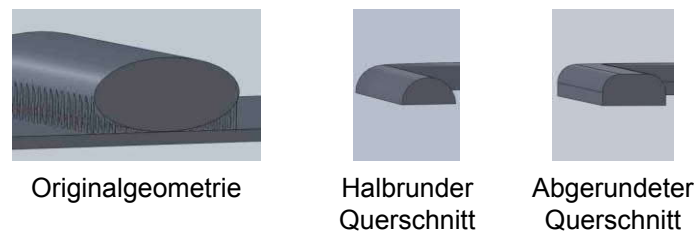


Bild 5-22: Anpassung des Querschnittes

Um die Möglichkeiten der additiven Fertigung zu nutzen, sollte nicht nur eine Anpassung erfolgen, die möglichst nah an der ursprünglichen Geometrie ist, sondern eine Optimierung des Bauteils im Hinblick auf die neuen Möglichkeiten. Ansätze dazu sind in Bild 5-23 dargestellt.

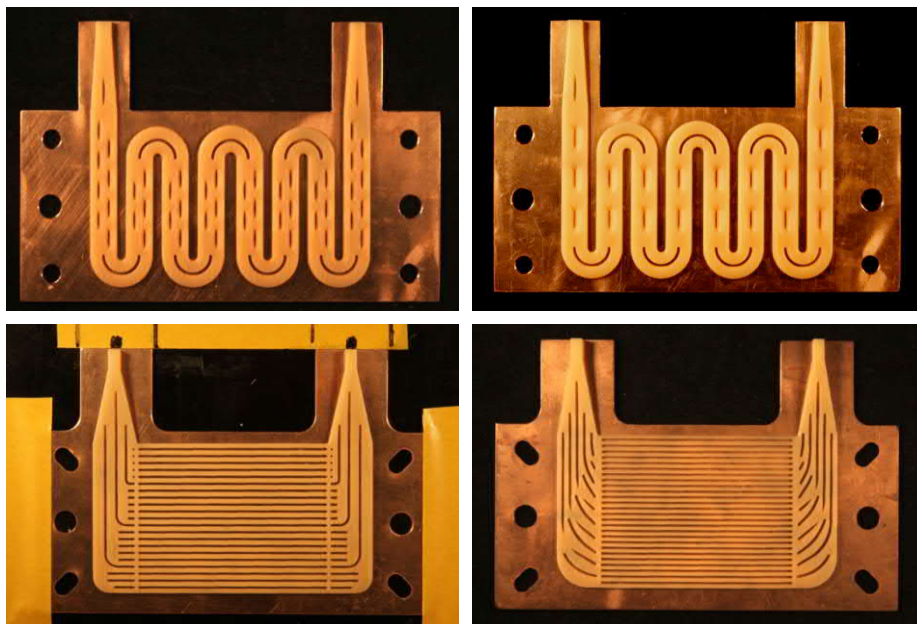


Bild 5-23: Unterschiedliche Wärmetauschergeometrien [233]

Die ersten beiden Ansätze sind noch nah an der Ausgangsgeometrie, jedoch wesentlich flacher und dafür mit breiterem Querschnitt. Lücken in den Kanalstrukturen

sollen dabei für ein gleichmäßigeres Wachstum sorgen und das Bauteil aufgrund der nur sehr geringen Wandstärke des Kupfers oberhalb der Kanäle stabilisieren. Die unteren Bilder zeigen eine sehr flache Struktur mit vielen kleinen Kanälen. Insgesamt wird so die Bauteildicke und das Gewicht stark reduziert und die Gesamtquerschnittsfläche des Strömungskanals trotzdem gleich gehalten.

Die einzelnen Schritte der Herstellung zeigt Bild 5-24. In a) ist zunächst ein Wärmetauscher in der vorgefertigten Blende vor der Galvanisierung zu sehen. Es folgt in b) der Moment der Aktivierung, in c) das fertig galvanisierte Modell sowie in d) das spanend bearbeitete Bauteil mit angebrachten Anschlussstücken. Die genaue Positionierung des Wachses auf dem Kupfer kann aufgrund des fehlenden Koordinatensystems in der Anlagensoftware nur über Versuche sichergestellt werden. So ist zunächst das Modell auf eine reguläre Bauplattform zu bauen und die Endpunkte zu markieren. Die Kupferplatte ist entsprechend der Markierungen zu befestigen. Eine Absenkung des Baubereiches muss erfolgen, um eine Kollision des Druckkopfes mit dem Kupfer zu vermeiden. So kann auch die Maßhaltigkeit in z-Richtung sichergestellt werden. Im Einsatzversuch zeigen die so hergestellten Wärmetauscher sehr gute Resultate, sowohl in der abgebildeten 50 cm² als auch in der wesentlich größeren 200 cm² Version. [232] [233] [236]

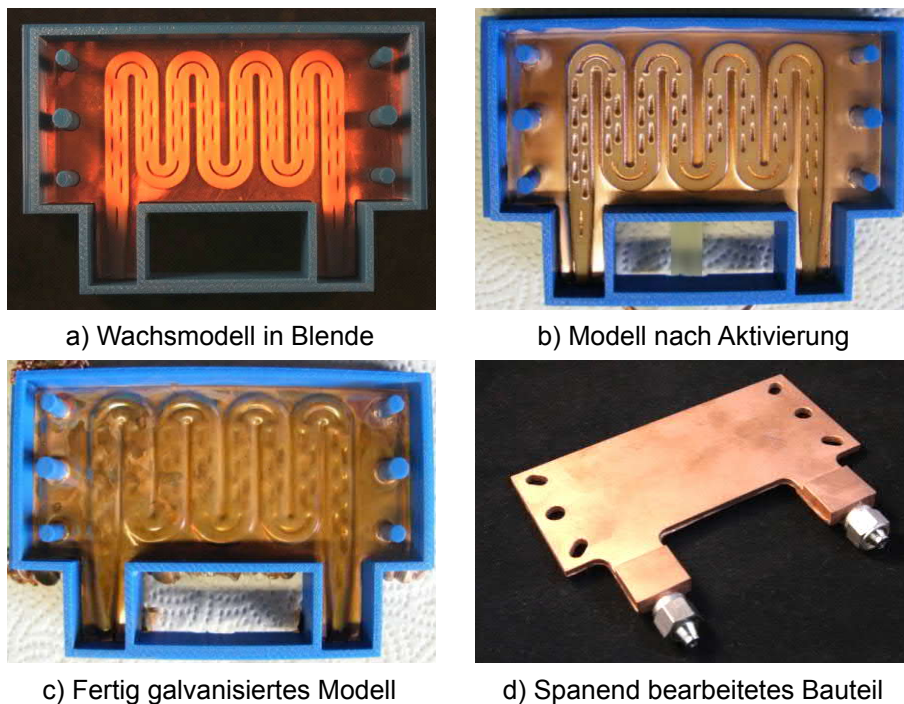


Bild 5-24: Zwischenstufen der Wärmetauscherherstellung [233]

Reformer

Die Herstellung des Reformermoduls stellt besondere Anforderungen an die Erzeugung der Wachsmodelle. Es besteht, wie in Bild 5-25 zu sehen nicht nur aus zu durchfließenden Innenstrukturen, sondern beinhaltet auch Reformerpellets, die für einen chemischen Prozess sorgen.

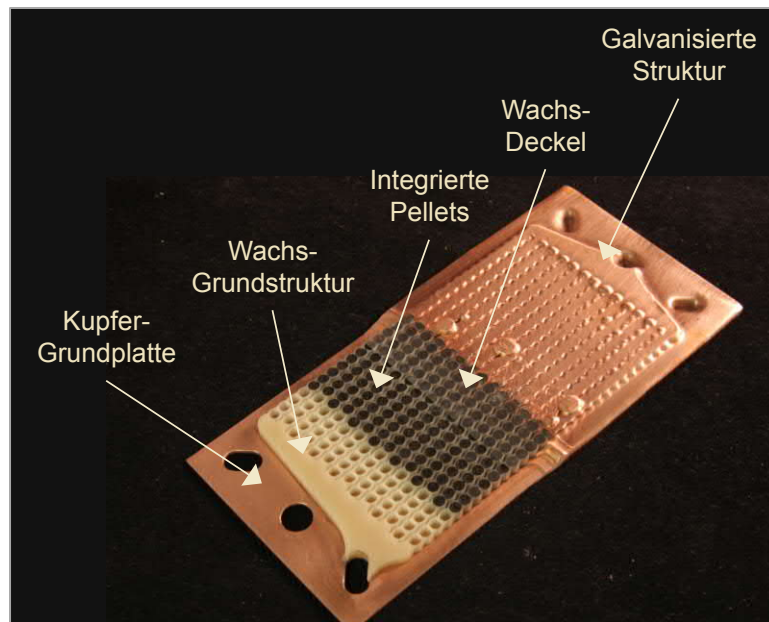


Bild 5-25: Aufbau des Reformermoduls

Die Herstellung der Wachsmodelle muss also wie in Bild 5-26 dargestellt mit Zwischenschritten erfolgen. Zunächst ist eine Wachs-Grundstruktur auf der Kupferplatte aufzubringen. Diese hat eine für das Einsetzen der Pellets vorgesehene Geometrie. Versuche führten zu einer minimalen Wandstärke von 0,3 mm und einem Durchmesser zum Einsetzen von 3,1 mm bei einem Pelletdurchmesser von 3 mm. Wichtig ist dabei, dass unter den Pellets eine dünne Wachsschicht vorhanden ist. Fehlt diese, besteht ein Kontakt der elektrisch leitenden Pellets mit der Kupferplatte beim Galvanisieren und mögliche Undichtigkeiten im später aufgetragenen Deckel führen zum Anwachsen von Kupfer an den Pellets. Der eben genannte Deckel wird nach dem manuellen Einsetzen der Pellets auf der vorherigen Struktur aufgebaut. Dabei ist besonders wichtig, dass beide mit dem Thermojet hergestellten Bauteile identische Außenmaße haben, da nur dann eine deckungsgleiche Fertigung aufgrund der mangelnden Einflussmöglichkeiten auf die Positionierung möglich ist. Die Starthöhe der Bauplattform muss angepasst werden, sodass es zu keiner Kollision mit dem Bauteil kommt. Abschließend folgt wie gewohnt die Galvanisierung und das abschließende Planfräsen. Die Pellets sind nach dem Ausschmelzen des Wachses innerhalb der für die einzelnen Pellets vorgesehenen Schächte frei beweglich und können durch die nun vorhandenen Spalte umströmt werden. [232] [233] [236]

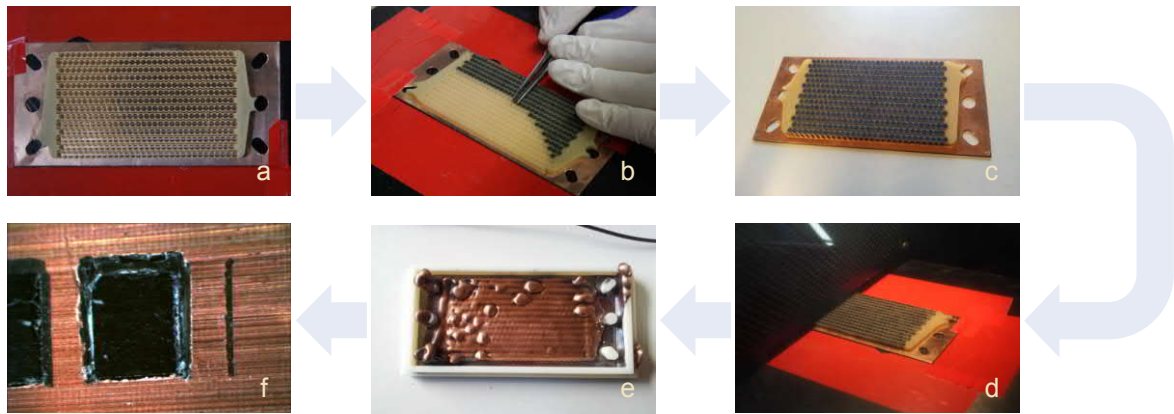


Bild 5-26: Herstellung des Reformersmoduls

Mehrschichtige Bauteile

Eine weitere Möglichkeit der Anwendung der Verfahrenskombination ist die Herstellung mehrschichtiger Bauteile mit unterschiedlichen Funktionen. Ein erster Schritt dazu ist die beidseitige Bestückung einer Kupferplatte mit unterschiedlichen Modellen. Mithilfe einer Hilfskonstruktion kann die schon bebaute Platte wieder in den Thermojet eingesetzt und mit einer zweiten Geometrie bestückt werden. Bild 5-27 zeigt beispielhaft ein zweiseitiges Bauteil mit einer Wärmetauscher- und einer Verdampferseite. Es sind zunächst beide Seiten der bebauten Kupferplatte, anschließend beide Seiten bei der Aktivierung und letztlich das plangefräste Bauteil zu sehen.

	Wärmetauscher	Verdampfer
Wachsmmodell beidseitig auf einer Kupferplatte in FLM-Blende		
Modell nach einiger Zeit der Galvanisierung		
Galvanogeformtes Bauteil nach dem Fräsen		

Bild 5-27: Zweiseitiges Modell

Nach Fertigstellung von beiden Seiten besteht nun die Möglichkeit auf das fertige, plangefräste Bauteil eine weitere Schicht mithilfe des Thermojets aufzubauen und den Prozess erneut zu durchlaufen. So können beliebig viele Funktionen in ein Bauteil integriert werden. [232] [233] [236]

Insgesamt kann durch die Verfahrenskombination eine Methode zur Herstellung von Brennstoffzellenkomponenten aufgezeigt werden, die zu enormen Gewichts-, Material- und Platzersparnissen führt. In erster Linie sind aber die Vorteile der Prozessstabilität im späteren Einsatz zu nennen. Durch die hohe Dichtheit der galvanisierten Bauteile kann ein störungsfreier Betrieb gewährleistet werden, der über herkömmliche Dichtungslösungen nicht gegeben ist. Weitere Anpassungsmöglichkeiten der Komponenten können zudem zur Erhöhung des Reformierungs- und somit des Wirkungsgrades der Brennstoffzelle führen.

6 Zusammenfassung

Die additiven Fertigungsverfahren sind eine im Vergleich zu vielen etablierten Verfahren sehr junge Technologie. Nicht zuletzt die derzeitige Forschungsintensität zeigt das enorme Potential, aber auch die Notwendigkeit der Weiterentwicklung. Besonders durch das FLM rückt der sogenannte 3D-Druck in den Fokus der Öffentlichkeit und steigert somit den Bekanntheitsgrad und den öffentlichen Druck für weitere Fortschritte. Ein aktueller Forschungsbereich und wesentlicher Kern dieser Arbeit ist die Oberflächenqualität, wobei hier der Ansatz des Eintauchens in Chemikalien gewählt und in Kapitel drei untersucht wird.

Zur Bestimmung der zu verwendenden Chemikalien erfolgt neben der Betrachtung der Beständigkeit des verwendeten Werkstoffes ABS ein Ranking bezüglich der Sicherheits- und Gesundheitsrisiken. Letztlich werden zehn potentielle Medien in ersten Untersuchungen betrachtet, wobei sich sieben für weitere Versuche qualifizieren können. Mit diesen werden zunächst Zeiten bestimmt, die einen guten Kompromiss aus hohen Oberflächenqualitäten und niedriger Formabweichung erwirken. Entsprechend der unterschiedlich aggressiven Wirkung auf ABS sind zwischen 15 Sekunden und 30 Minuten notwendig. Es folgt die Betrachtung der Oberflächenqualität der so nachbehandelten Bauteile an verschiedenen Orientierungen. Dabei stellt sich heraus, dass beispielsweise Ethylmethylketon den Ra Wert von 0° orientierten Flächen im Durchschnitt um den Faktor 26,6 reduziert. Auch das preiswerte Aceton erreicht immerhin Faktoren von ca. 15 an so orientierten Flächen. Die entsprechenden Ra Werte sind 0,65 bzw. etwas über $1\text{ }\mu\text{m}$. Entsprechend der schlechteren Ausgangsrauheit sind anders orientierte Flächen mit beispielsweise $3\text{ }\mu\text{m}$ für Ethylmethylketon auch nachbehandelt rauer. Durch die Anpassung der Einwirkzeiten sind die erreichten Rauheitswerte der unterschiedlichen Chemikalien relativ ähnlich. Um auch andere Bauteileigenschaften zu betrachten, erfolgt zunächst eine Reduzierung der verwendeten Medien. Ethylmethylketon wird aufgrund der besten Oberflächenqualität gewählt, Aceton aufgrund der guten Verfügbarkeit und des niedrigen Preises. Mit Toluol soll ein Mittel mit längerer Einwirkzeit (5 Minuten) betrachtet werden. Mit diesen Mitteln werden Versuche zur Farbbeständigkeit, Form- und Maßhaltigkeit sowie einiger mechanischer Eigenschaften durchgeführt. Auch in diesen Bereichen stellt sich heraus, dass die Anpassung der Einwirkzeiten zu vergleichbaren Ergebnissen führt. Dabei wird keine Modelleigenschaft in starkem Ausmaß negativ beeinflusst. Die Wirkung auf Form- und Maßhaltigkeit ist mit Ausnahme kleinster Stege, Bohrungen sowie Spalte derart gering, dass sie die Genauigkeit des Verfahrens nicht beeinträchtigt. Auch bei den Zugeigenschaften sind die Einflüsse nur gering. Während die Dehnungseigenschaften sowohl bei stehenden als auch bei liegenden Proben leicht verbessert werden, sinkt die Festigkeit bei liegenden Proben minimal, während sie

bei stehenden deutlich steigt. Hier zeigt sich besonders die unterschiedliche Wirkung der Chemikalien auf die verschiedenen Orientierungen. Dies zeigen auch REM-Aufnahmen, bei denen deutlich wird, dass an senkrechten Flächen kaum ein Eindringen geschieht. An liegenden Flächen wird eine Einwirktiefe mit zunehmender Einwirkzeit und demnach schwächerem Medium deutlich. Die Dichte der Bauteile wird nicht merklich beeinträchtigt, die Gasdichtheit hingegen deutlich. Insgesamt ist festzuhalten, dass bei der chemischen Nachbehandlung deutliche Verbesserungen der Oberflächen bei nur geringem Einfluss auf andere Materialeigenschaften zu erreichen sind.

Im folgenden Kapitel vier wird die Unbeständigkeit von ABS genutzt, um galvanisch beschichtete Kerne gänzlich auszulösen. Mit dem preiswerten und schnell wirkenden Aceton kann ein rückstandsloses Entfernen erfolgen, wobei durch Versuche gezeigt wird, dass eine erhöhte Temperatur zur deutlichen Steigerung der Prozessgeschwindigkeit führt. Auch eine ausreichende Bewegung trägt zur Beschleunigung des Auflösenden bei. Es wird zudem ein Zusammenhang zwischen der ABS Farbe und der Auflösezeit festgestellt. Helle Farben sind zur schnellen Auflösung zu bevorzugen. Die Oberflächennachbehandlung kann bei dieser Anwendung genutzt werden, um die Qualität der galvanischen Abscheidung zu verbessern. Abschließend werden die Möglichkeit des Recyclings und eine beispielhafte Prozesskette gezeigt.

Im fünften Kapitel werden Blenden für die Galvanik aus FLM Bauteilen genutzt, um einen definierten Bereich der Abscheidung zu schaffen. Auch hier erfolgt ein direkter Nutzen der chemischen Nachbehandlung. Die Dichtheit der Blenden sorgt dafür, dass diese wiederverwendet werden können. Zudem können durch die nun glatten Oberflächen mehrere Komponenten deutlich besser wieder lösbar gefügt werden. Auch die Entformung wird erleichtert. In Simulationen und durch Versuche kann festgestellt werden, dass die Blenden einen deutlichen Einfluss auf die Abscheidungen haben. Einerseits durch die direkte Ablenkung der Feldlinien, andererseits durch den Einfluss auf die Konvektion und somit die Verarmung des Elektrolyten. Durch eine gezielte, frontale Anströmung und die Verwendung einer offenen Blende ist beispielsweise eine sehr gute Abscheidungsqualität zu erreichen. Abschließend werden FLM-Blenden für die Herstellung von Brennstoffzellenkomponenten genutzt. Dabei kommen zudem additive Wachsmodelle auf Kupferplatten zum Einsatz, die spätere Hohlstrukturen abbilden.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit die Auswirkungen einer sehr effektiven Oberflächenoptimierung auf FLM-Bauteile sowie den daraus resultierenden Nutzen im Einsatz in der Galvanik. Für weitere Untersuchungen bietet sich neben einer detaillierten Betrachtung der Einwirkzeiten für spezielle Anwendungen auch die Übertragung auf Gussprozesse an, um die Technologie weiter im Markt zu etablieren.

7 Literaturverzeichnis

- [1] C.W. Hull, "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography," US 4575330, 11. Mai 1986.
- [2] T. Wohlers, *Wohlers Report 2013: State of the Industry - Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins, Colorado, USA: Wohlers Associates Inc., 2013.
- [3] G. Witt, *Taschenbuch der Fertigungstechnik*, 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [4] M.F. Zäh, *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien - Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*, 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [5] A. Gebhardt, *Generative Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing*, 3. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [6] I. Gibson, D.W. Rosen und B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, 1. Auflage. New York, New York, USA: Springer Science+Business Media, 2010.
- [7] *Generative Fertigungsverfahren: Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) - Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen*, VDI Richtlinie 3404, 2009.
- [8] G. Witt, J.T. Sehr, A. Ambrosy, T. Grimm und A. Wegner, "Do it yourself 2.0: Jetzt aber wirklich selbst? - Bedeutung der generativen Fertigungsverfahren für die Produktion von morgen: Stand der Technik, Chancen und Risiken," *Industrie Management*, Band 29, Ausgabe 2, S. 7-10, 2013.
- [9] G. Witt, J.T. Sehr, T. Grimm und A. Wegner, "Do it yourself 2.0: Stand der Technik, Chancen und Risiken des 3D-Drucks im gewerblichen Bereich," in *IHK Ruhr, 3D-Druck - Die nächste industrielle Revolution?*, Essen, 2013.
- [10] S. Danjou und P. Köhler, "Ermittlung optimaler Bauteilorientierung zur Verbesserung der Prozessplanung in der CAD/RP-Kette," in *Tagungsband der Rapid.Tech 2009 - Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-*

Technologie, Erfurt, 2009.

- [11] P.M. Pandey, K. Thrimurthulu und N. Venkata Reddy, "Optimal Part Deposition Orientation in FDM by Using a Multicriteria Genetic Algorithm," *International Journal of Production Research*, Band 42, Ausgabe 19, S. 4069-4089, 2004.
- [12] R. Anitha, S. Arunachalam und P. Radhakrishnam, "Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling," *Journal of Material Processing Technology*, Band 118, Ausgabe 1-3, S. 385-388, 2001.
- [13] C.C. Wang, T.-W. Lin und S.-S. Hu, "Optimizing the Rapid Prototyping Process by Integrating the Taguchi Method with the Gray Relational Analysis," *Rapid Prototyping Journal*, Band 13, Ausgabe 5, S. 305-315, 2007.
- [14] J. Martínez, J.L. Diéguez, A. Pereira und J.A. Pérez, "Modelization of Surface Roughness in FDM Parts," in *The 4th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2011)*, Cadiz, Spain, 2012, S. 849-856.
- [15] P. Sreedhar, C. MathikumarManikandan und G. Jothi, "Experimental Investigation of Surface Roughness for Fused Deposition Modeled Part with Different Angular Orientation," *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Band 5, Ausgabe 3, S. 21-28, 2012.
- [16] Stratasys Inc., *Guidelines for Preparing and Painting FDM Parts*. Eden Prairie, Minnesota, USA, 2011.
- [17] Stratasys Inc., *Comparison of Sealing Methods for FDM Materials*. Eden Prairie, Minnesota, USA, 2011.
- [18] Stratasys Inc., *Part Dipping*. Eden Prairie, Minnesota, USA, 2009.
- [19] L.M. Galantucci, F. Lavecchia und G. Percoco, "Experimental Study Aiming to Enhance the Surface Finish of Fused Deposition Modeled Parts," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Band 58, Ausgabe 1, S. 189-192, 2009.
- [20] L.M. Galantucci, F. Lavecchia und G. Percocco, "Quantitative Analysis of a Chemical Treatment to Reduce Roughness of Parts Fabricated Using Fused Deposition Modeling," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Band 59, Ausgabe 1, S. 247-250, 2010.

- [21] G. Percoco, F. Lavecchia und L.M. Galantucci, "Compressive Properties of FDM Rapid Prototypes Treated with a Low Cost Chemical Finishing," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Band 4, Ausgabe 19, S. 3838-3842, 2012.
- [22] A.S. Rao, M.A. Dharap, J.V.L. Venkatesh und D. Ojha, "Investigation of Post Processing Techniques to Reduce the Surface Roughness of Fused Deposition Modeled Parts," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Band 3, Ausgabe 3, S. 531-544, 2012.
- [23] J. Mireles et al., "Analysis of Sealing Methods for FDM-fabricated Parts," in *Proceedings of the 22nd Solid Freeform Symposium*, Austin, Texas, USA, 2011, S. 185-196.
- [24] E.J. McCullough und V.K. Yadavalli, "Surface Modification of Fused Deposition Modeling ABS to Enable Rapid Prototyping of Biomedical Microdevices," *Journal of Materials Processing Technology*, Band 213, Ausgabe 6, S. 947-954, 2013.
- [25] S. Danjou und P. Köhler, "Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz - eine Schnittstellenproblematik," in *Tagungsband der Rapid.Tech 2008 - Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologien*, Erfurt, 2008.
- [26] P. Köhler, *Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau*, 1. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 2002.
- [27] C.K. Chua, K.F. Leong und C.S. Lim, *Rapid Prototyping - Principles and Applications*, 2. Auflage. Singapur: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003.
- [28] *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einleitung*, DIN 8580:2003.
- [29] K. Wegener, "Additive Technologien in der Fertigung; Zuverlässigkeit und Standards," in *8. Swiss RaPID Forum 2012*, St. Gallen, Schweiz, 2012.
- [30] M. Meindl, *Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing*. Dissertation, Technische Universität München, München, 2005.
- [31] U. Berger, A. Hartmann und D. Schmid, *Additive Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing*, 1. Auflage. Haan-Gruiten:

- Europa Lehrmittel Verlag, 2013.
- [32] M.A. Macht, *Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping*. Dissertation, Technische Universität München, München, 1999.
- [33] M. Burns, *Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing*, 1. Auflage. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1993.
- [34] S. Upcraft und R. Fletcher, "The Rapid Prototyping Technologies," *Assembly Automation*, Band 23, Ausgabe 4, S. 318-330, 2003.
- [35] S. Kleszczynski und G. Witt, "Standardisierung als Grundlage für i-Manufacturing," in *5. Merseburger Rapid Prototyping Forum*, Merseburg, 2011.
- [36] J. Lenz, "ISO, ASTM and VDI - International Public Standards for Additive Manufacturing," in *EOS International User Meeting 2013 (IUM)*, Saalfelden, Österreich, 2013.
- [37] B. Stucker, "Additive Manufacturing: Standards & Other International Trends," in *Workshop on Measurement and Standards for Metal-based Additive Manufacturing*, Gaithersburg, Maryland, USA, 2012.
- [38] F.-J. Villmer, "Quo vadis, Rapid Prototyping?," in *18. Fachtagung Rapid Prototyping - Die industrielle Revolution durch Additive Fertigung*, Lemgo, 2013.
- [39] G. Witt und J.T. Sehr, "Rapid Technologien auf dem Weg zum Serienteil?," in *VDI Freundeskreis technischer Führungskräfte*, Düsseldorf, 2006.
- [40] G.N. Levy, R. Schindel und J.P. Kruth, "Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future Perspectives," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Band 52, Ausgabe 2, S. 589-609, 2003.
- [41] P. Vasconcelos, F. Jorge Lino und R.J. Neto, "The Importance of Rapid Tooling in Product Development," *Key Engineering Materials*, Band 2002, Ausgabe 230-232, S. 169-172, 2002.
- [42] C.-K. Chua, K.-H. Hong und S.-L. Ho, "Rapid Tooling Technology. Part 1. A Comparative Study," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Band 15, Ausgabe 8, S. 604-608, 1999.

- [43] S. Kinkel, "Anforderungen an die Fertigungstechnik von morgen: Wie verändern sich Variantenzahlen, Losgrößen, Materialeinsatz, Genauigkeitsanforderungen und Produktlebenszyklen tatsächlich?," *Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)*, Ausgabe 37, 2005.
- [44] J. Weidinger und M. Methner, "Rapid Technologie auf dem Weg zur Serienfertigung," *Kunststoffe*, Band 2005, Ausgabe 5, S. 68-72, 2005.
- [45] J.T. Sehrdt und G. Witt, "Rapid Technologien im Spannungsfeld zwischen Rapid Prototyping (RP) und Rapid Manufacturing (RM)," in *Freitagsseminar am Forschungsinstitut Edelmetalle und Metallchemie (FEM)*, Schwäbisch Gmünd, 2007.
- [46] S. Bartolo, A. Jorge und F. da Conceicao Batista, *Virtual and Rapid Manufacturing - Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 1. Auflage. London, UK: Taylor & Francis Group, 2007.
- [47] D.-K. Ahn, H.-C. Kim und S.-H. Lee, "Surface Roughness Prediction Using Measured Data and Interpolation in Layered Manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, Band 209, Ausgabe 2, S. 664-671, 2009.
- [48] D.-K. Ahn, H.C. Kim und S.-H. Lee, "Determination of Fabrication Direction to Minimize Post-machining in FDM by Prediction of Non-linear Roughness Characteristics," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Band 19, Ausgabe 1, S. 144-155, 2006.
- [49] D.-K. Ahn, S.-M. Kwon und S.-H. Lee, "Expression for Surface Roughness Distribution of FDM Processed Parts," in *International Conference on Smart Manufacturing Application*, Gyeonggi-do, Südkorea, 2008, S. 490-493.
- [50] P.M. Pandey, *Enhancement of Surface Finish in Fused Deposition Modelling*. Dissertation, Indian Institute of Technology Kanpur (IITK), Kanpur, Uttar Pradesh, Indien, 2003.
- [51] J. Gausemeier, *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing - Exploring the Research Landscape*. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2013.
- [52] Stratasys Inc., *dimension 3D Printers - Ihre Ideen dreidimensional*. Eden

Prairie, Minnesota, USA, 2013.

- [53] Arburg GmbH & Co KG. *Freeformer: Die Welt frei formen*, [Online]. Verfügbar: http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Prospekte/ARBURG_freeformer_680835_de.pdf [Zugriff am: 26. Februar 2014]
- [54] Beijing TierTime Technology Co., Ltd., *Products & Services*, [Online]. Verfügbar: <http://www.tiertime.com/en/product.asp> [Zugriff am: 26. Februar 2014]
- [55] iSQUARED GmbH, *Hochwertiges FDM Verbrauchsmaterial zu fairen Preisen!*, [Online]. Verfügbar: <http://www.isquared.eu.com/hochwertiges-fdm-verbrauchs-material-zu-fairen-preisen> [Zugriff am: 25. Februar 2014]
- [56] T.J. Dahlin, B.C. Nelson und K.D. Docken, "Rapid Prototyping System with Filament Supply Spool Monitoring," US 6022207, 8. Februar 2000.
- [57] K. Fricke, *Digitaltechnik - Lehr- und Übungsbuch für Elektrotechniker und Informatiker*, 5. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- [58] G.W. Ehrenstein und S. Pongartz, *Beständigkeit von Kunststoffen*, 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [59] Stratasys Inc., *FDM-Thermoplaste: 3D-Druck robuster Bauteile mit leistungsfähigen Materialien*, [Online]. Verfügbar: <http://www.stratasys.com/de/materialien/fdm> [Zugriff am: 10. März 2014]
- [60] S.S. Crump, "Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects," US 5121329, 9. Juni 1992.
- [61] N.N., "Fachmesse "Rapid.Tech" bekommt eine "coole Schwester" - "FabCon 3.D" thematisiert 3D-Druck," *VDI-Z*, Band 155, Ausgabe 4, S. 15, 2013.
- [62] S. Michel, "Fabcon 3.D 2013 - Rapidtech reagiert auf das Massenphänomen 3D-Druck," *Maschinenmarkt*, Band 2013, Ausgabe 9, S. 18, 2013.
- [63] H.-J. Bullinger, D. Spath, H.-J. Warnecke und E. Westkämper, *Handbuch Unternehmensorganisation - Strategie, Planung, Umsetzung*, 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [64] C. Pettey und R. van der Meulen, *GARTNER: Gartner's 2012 Hype Cycle for*

- Emerging Technologies Identifies "Tipping Point" Technologies that will unlock Long-Awaited Technology Scenarios*, [Online]. Verfügbar: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2124315> [Zugriff am: 21. Februar 2014]
- [65] J. Rivera und R. van der Meulen, *GARTNER: Gartner's 2013 Hype Cycle for Emerging Technologies Maps out Evolving Relationship between Humans and Machines*, [Online]. Verfügbar: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2575515> [Zugriff am: 21. Februar 2014]
- [66] T. Laliberté, C.M. Gosselin und G. Cote, "Practical Prototyping - A Rapid Prototyping Framework for Fast and Cost-Effective Design of Robotic Mechanism Prototypes," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Band 8, Ausgabe 3, S. 43-52, 2001.
- [67] A. Ahmadi Nadooshan, S. Daneshmand und C. Aghanajafi, "Application of RP Technology with Polycarbonate Material for Wind Tunnel Model Fabrication," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Band 2007, Ausgabe 32, 2007.
- [68] S. Daneshmand, C. Aghanajafi und A. Ahmadi Nadooshan, "The Effect of Chromium Coating in RP Technology for Airfoil Manufacturing," *Sadhana of Indian Academy of Science*, Band 35, Ausgabe 5, S. 569-584, 2010.
- [69] U. Chandrasekhar, K. Venkatesh, K. Elangovan und T. Rangaswamy, "Integrated Use of Rapid Prototyping and Metal Plating Techniques for Development of Micro Air Vehicles," *International Journal of Engineering Science and Technology*, Band 3, Ausgabe 1, S. 188-193, 2011.
- [70] R. Patil, S. Mohan Kumar und E. Abhilash, "Fabrication of Flapping Wing Micro Air Vehicle using Rapid Prototyping Technology," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Band 2, Ausgabe 2, S. 56-60, 2012.
- [71] C. Ziemian, R. Ziemian und E. Barker, "Shake-table Simulation Study of Small Scale Layered Models," *Rapid Prototyping Journal*, Band 16, Ausgabe 1, S. 4-11, 2010.
- [72] A. Gao und A.H. Techet, "Design Considerations for a Robotic Flying Fish," in *Conference Publications of OCEANS 2011*, Waikoloa Village, Hawaii, USA, 2011.

- [73] Stratasys Inc., *3D Printing Case Studies*, [Online]. Verfügbar: <http://www.stratasys.com/resources/case-studies> [Zugriff am: 05. März 2014]
- [74] A.H. Fritz und G. Schulze, *Fertigungstechnik*, 8. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [75] P. Blake, E. Fodran, M. Koch und U. Menon, "FDM of ABS Patterns for Investment Casting," in *Proceedings of the 8th Solid Freeform Symposium*, Austin, Texas, USA, 1997, S. 195-202.
- [76] C. Gouldsen und P. Blake, *Investment Casting Using FDM/ABS Rapid Prototype Patterns.*, 1998.
- [77] M.H. Idris, S. Sharif und W.S. Wan Harun, "Evaluation of ABS Patterns Produced from FDM for Investment Casting Process," in *Proceedings of the 9th Asia Pasific Industrial Engineering & Management Systems Conference*, Nusa Dua, Bali, Indonesien, 2008.
- [78] C.M. Cheah, C.K. Chua, C.W. Lee, C. Feng und K. Totong, "Rapid Prototyping and Tooling Techniques: A Review of Applications for Rapid Investment Casting," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Band 25, Ausgabe 3-4, S. 308-320, 2005.
- [79] C.W. Lee, C.K. Chua, C.M. Cheah, L.H. Tan und C. Feng, "Rapid Investment Casting: Direct and Indirect Approaches via Fused Deposition Modelling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Band 23, Ausgabe 1-2, S. 93-101, 2004.
- [80] D.K. Pal und B. Ravi, "Rapid Tooling Route Selection and Evaluation for Sand and Investment Casting," *Virtual and Physical Prototyping Journal*, Band 2, Ausgabe 4, S. 197-207, 2007.
- [81] D.S. Ingole, A.M. Kuthe, S.B. Thakare und A.S. Talankar, "Rapid Prototyping - A Technology Transfer Approach for Development of Rapid Tooling," *Rapid Prototyping Journal*, Band 15, Ausgabe 4, S. 280-290, 2009.
- [82] V. Townsend und J. Urbanic, "Relating Additive and Subtractive Processes in a Teleological and Modular Approach," *Rapid Prototyping Journal*, Band 18, Ausgabe 4, S. 324-338, 2012.
- [83] J.A. Grande, "Blow Molders & Thermoformers Try Plastic Rapid Tooling,"

- Plastics Technology*, Band 2008, Ausgabe 7, S. 49-51, 2008.
- [84] J. Hanssen, *Carbon Fiber Lay-ups*. Eden Prairie, Minnesota, USA: Stratasys Inc., 2009.
- [85] B. Macy, "Rapid/Affordable Composite Tooling Strategies Utilizing Fused Deposition Modeling," *SAMPE Journal*, Band 47, Ausgabe 4, 2011.
- [86] M. Mabie, *Metal Forming with FDM Tooling*. Eden Prairie, Minnesota, USA: Stratasys Inc., 2010.
- [87] D.M. Dietrich, J.G. Macke und R.W. Scott, "Method and Apparatus for Rapidly Generating Tooling for Press Machines," US 2008/0065259, 13. Mai 2008.
- [88] D.M. Dietrich, J.G. Macke und R.D. Washington, "Method and Apparatus for Rapidly Generating Aerospace Tools," US 8178033, 15. Mai 2012.
- [89] S.S. Crump, *Direct Digital Manufacturing Part Two - Advantages and Considerations*. Eden Prairie, Minnesota, USA: Stratasys Inc., 2009.
- [90] S.S. Crump, *Direct Digital Manufacturing Part Four - Industries and Applications*. Eden Prairie, Minnesota, USA: Stratasys Inc., 2009.
- [91] K. Esfandiyar, M. Syed und Y. Morsi, "Design and Fabrication of Reconstructive Mandibular Models Using Fused Deposition Modeling," *Assembly Automation*, Band 28, Ausgabe 3, S. 246-254, 2008.
- [92] R. Dhakshyani und Y. Nukman, "FDM Models and FEA in Dysplastic Hip," *Rapid Prototyping Journal*, Band 18, Ausgabe 3, S. 215-221, 2012.
- [93] W.A.Y.W. Yusoff, H.H.M. Ali und M.A.H.M. Shukri, "Fabrication of Surgical Cranioplasty Biomodel Using Fused Deposition Modeling," in *International Conference on Innovation, Management and Technology Research*, Malacca, Malaysia, 2012, S. 550-554.
- [94] Stratasys Inc., *Dimension BST 1200es / SST 1200es User Guide*. Eden Prairie, Minnesota, USA, 2008.
- [95] Stratasys Inc., *User Guide uPrint by Dimension*. Eden Prairie, Minnesota, USA, 2008.

- [96] N. Kanani, *Galvanotechnik: Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie*, 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2009.
- [97] P. Dobrinski, G. Krakau und A. Vogel, *Physik für Ingenieure*, 10. Auflage. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2003.
- [98] V.M. Schmidt, *Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung*, 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003.
- [99] D. Forst, M. Kolb und H. Roßwag, *Chemie für Ingenieure*, 1. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [100] C.H. Hamann und W. Vielstich, *Elektrochemie*, 3. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 1998.
- [101] K. Dobzin, *Oberflächentechnik für den Maschinenbau*, 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2013.
- [102] B. Gaida, B. Andreas und K. Assmann, *Technologie der Galvanotechnik*, 2. Auflage. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2008.
- [103] GMU Duisburg, *Electroanalytical Chemistry - Skriptum*. Duisburg, 2002.
- [104] R.J. von Gutfeld und J.C. Puipe, "Erhöhung der Metallabscheidungs- und Metallauflösungsgeschwindigkeit," *Oberfläche - Surface*, Band 22, Ausgabe 9, S. 294-297, 1981.
- [105] M. Busch, Persönliches Gespräch, August 2013.
- [106] G.D. Kim und Y.T. Oh, "A Benchmark Study on Rapid Prototyping Processes and Machines: Quantitative Comparisons of Mechanical Properties, Accuracy, Roughness, Speed and Material Cost," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Band 222, Ausgabe 2, S. 201-215, 2008.
- [107] RTC - Rapid Technologies & Consulting, *Preisübersicht: Dimension*. Hofheim, 2013.
- [108] RTC - Rapid Technologies & Consulting, *Preisübersicht: Objet/Eden/Connex*. Hofheim, 2013.

- [109] R.I. Campbell, M. Martorelli und H.S. Lee, "Surface Roughness Visualisation for Rapid Prototyping Models," *Computer-Aided Design*, Band 34, Ausgabe 10, S. 717-725, 2002.
- [110] H.S. Byun und K.H. Lee, "Determination of Optimal Build Direction in rapid Prototyping with Variable Slicing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Band 28, Ausgabe 3-4, S. 307-313, 2006.
- [111] A.K. Sood, R.K. Ohdar und S.S. Mahapatra, "Improving Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modelling Processed Part Using Grey Taguchi Method," *Materials and Design*, Band 30, Ausgabe 10, S. 4243-4252, 2009.
- [112] A. Garg, *A Fuzzy-Taguchi Approach for Improving Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modelling (FDM) Built Parts*. Bachelorarbeit, National Institute of Technology Rourkela, Indien, 2010.
- [113] A. Gregorian et al., "Accuracy Improvement in Rapid Prototyping Machine (FDM-1650)," in *Proceedings of the 8th Solid Freeform Symposium*, Austin, Texas, USA, 2001, S. 77-84.
- [114] O.S. Es-Said et al., "Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples," *Materials and Manufacturing Processes*, Band 15, Ausgabe 1, S. 107-122, 2000.
- [115] S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy und P.K. Wright, "Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS," *Rapid Prototyping Journal*, Band 8, Ausgabe 4, S. 248-257, 2002.
- [116] A. Bellini und S. Güçeri, "Mechanical Characterization of Parts Fabricated Using Fused Deposition Modeling," *Rapid Prototyping Journal*, Band 9, Ausgabe 4, S. 252-264, 2003.
- [117] C.S. Lee, S.G. Kim, H.J. Kim und S.H. Ahn, "Measurement of Anisotropic Compressive Strength of Rapid Prototyping Parts," *Journal of Materials Processing Technology*, Band 2007, Ausgabe 187-188, S. 627-630, 2007.
- [118] K.C. Ang, K.F. Leong und C.K. Chua, "Investigation of the Mechanical Properties and Porosity Relationships in FDM-fabricated Porous Structures," *Rapid Prototyping Journal*, Band 12, Ausgabe 2, S. 100-105, 2006.
- [119] L.M. Galantucci, F. Lavecchia und G. Peroco, "Study of Compression

- Properties of Topologically Optimized FDM Made Structured Parts," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Band 57, Ausgabe 1, S. 243-246, 2008.
- [120] A.K. Sood, R.K. Ohdar und S.S. Mahapatra, "Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts," *Materials & Design*, Band 31, Ausgabe 1, S. 287-295, 2010.
- [121] C. Ziemian, M. Sharma und S. Ziemian, "Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling," *Mechanical Engineering*, S. 159-180, 2012.
- [122] W.R. Friedman und D.T. Smith, "Smoothing Method for Layered Deposition Modeling," US 2005/0173838, 11. August 2005.
- [123] R.L. Zinniel, "Vapor Smoothing Surface Finishing System," US 2009/0321972, 31. Dezember 2009.
- [124] T. Wohlers, *Wohlers Report 2011: State of the Industry - Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins, Colorado, USA: Wohlers Associates Inc., 2011.
- [125] Stratasys Inc., *Finishing Touch Smoothing Station*. Eden Prairie, Minnesota, USA, 2011.
- [126] Stratasys Inc., *Fortus Finishing Stations*. Eden Prairie, Minnesota, USA, 2009.
- [127] DuPont Fluorochemicals, *Du Pont Vertrel SDG - Specialty Fluid*. Wilmington, Delaware, USA, 2008.
- [128] Microcare Corporation, *Safety Data Sheet: SSF - Microcare SFF, Smoothing Station Fluid*. New Britain, Connecticut, USA, 2009.
- [129] M. Daunerer, *Klinische Toxikologie. Giftinformation, Giftnachweis, Vergiftungstherapie*. Landsberg/Lech: ecomed, 1995-2006.
- [130] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). *Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV) (von 2010)*, [Online]. Verfügbar: <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Rechtstexte/pdf/Gefahrstoffverordnung.pdf> [Zugriff am: 11. Februar 2014]
- [131] P. König, "Poliernebel; 3D-Drucke härten und auf Hochglanz bringen," *c't*,

- Band 2013, Ausgabe 20, S. 162-163.
- [132] *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*, DIN EN ISO 9000:2005.
- [133] G. Linß, *Qualitätsmanagement für Ingenieure*, 3. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [134] H. Brüggemann und P. Bremer, *Grundlagen Qualitätsmanagement: Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*, 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [135] J.T. Sehr, *Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Aachen, 2010.
- [136] *Kunststoffe: Normklimate für Konditionierung und Prüfung*, DIN EN ISO 291:2008.
- [137] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure - Von der Synthese bis zur Anwendung*, 3. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [138] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer und T. Hirth, *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, 7. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [139] J. Feßmann und H. Orth, *Angewandte Chemie und Umwelttechnik für Ingenieure - Handbuch für Studium und betriebliche Praxis*, 2. Auflage. Landsberg: Ecomed Sicherheit in der Ecomed Verlagsgesellschaft AG & Co. KG, 2002.
- [140] C.M. Hansen, *Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook*, 1. Auflage. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC, 2000.
- [141] Y.W. Mai, "Fracture Initiation and Crack Propagation of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) in Organic Solvents," *Journal of Materials Science*, Band 1976, Ausgabe 11, S. 303-316, 1976.
- [142] H. Mollet und A. Grubenmann, *Formulierungstechnik - Emulsionen, Suspensionen, Feste Formen*, 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 1999.

- [143] O. Aschenbrenner, *Untersuchungen zu Phasengleichgewichten und Transportvorgängen gelöster Metallverbindungen in überkritischem Kohlendioxid*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2007.
- [144] G. Schwedt, *Plastisch, elastisch, fantastisch - Ohne Kunststoffe geht es nicht*, 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2013.
- [145] A. Diedrichs, *Evaluation und Erweiterung thermodynamischer Modelle zur Vorhersage von Wirkstofflöslichkeiten*. Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg, 2010.
- [146] Ahlborn Kunststoffe, *Chemische Beständigkeiten ABS*, [Online]. Verfügbar: <http://www.ahlborn-kunststoffe.at/index.php/technische-informationen-kunststoffbearbeitung-bearbeitungsrichtlinien-chemischen-bestaendigkeiten-eigenschaften/chemische-bestaendigkeiten-kunststoffen/chemische-bestaendigkeiten-abs-kunststoffen.html> [Zugriff am: 25. Februar 2014]
- [147] REHAU - Unlimited Polymer Solutions. *Acrylnitril-Butadien-Styrol (RAU-ABS) - Materialmerkblatt AV 0270*, [Online]. Verfügbar: http://www.rehau.com/linkableblob/NO_no/1014424/data/ [Zugriff am: 25. Februar 2014]
- [148] K. Fent, *Ökotoxikologie: Umweltchemie - Toxikologie - Ökologie*, 4. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2013.
- [149] H. Dennig, *Gefahrstoff-Fibel - Umgang mit Gefahrstoffen auf Grundlage der europäischen Gesetzgebung*, 1. Auflage. Norderstedt: Grin Verlag, 2009.
- [150] IFA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, *Gefahrstoffinformationssystem (GESTIS) Stoffdatenbank*, [Online]. Verfügbar: <http://www.dguv.de/ifa/Gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index.jsp> [Zugriff am: 21. Februar 2014]
- [151] M. Tausch und M. von Wachtendonk, *Chemie SII: Stoff - Formel - Umwelt*, 2. Auflage. Bamberg: C.C. Buchners Verlag, 1993.
- [152] T. Engel und P.J. Reid, *Physikalische Chemie*. München: Pearson Studium, 2006.
- [153] M. Rasche, *Handbuch Klebetechnik*, 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2012.

- [154] S. Pongratz, *Die Alterung von Thermoplasten*. Habilitationsschrift, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2005.
- [155] *Rauheitsmessung mit elektrischen Tastschnittgeräten*, VDI/VDE Richtlinie 2602, 1983.
- [156] *Gestaltabweichung: Begriffe, Ordnungssystem*, DIN 4760:1982.
- [157] *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten*, DIN EN ISO 3274:1998.
- [158] *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*, DIN EN ISO 4287:2010.
- [159] *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*, DIN EN ISO 4288:1998.
- [160] *Zerstörungsfreie Prüfung: Sichtprüfung: Allgemeine Grundlagen*, DIN EN 13018:2001.
- [161] Andreas Kraushaar, "Farbverbindliche Wiedergabe am Bildschirm (Soft-proofing): Wunsch und Wirklichkeit," in *Media Event Ilmenau*, Ilmenau, 2010.
- [162] *Farbmetrik – Teil 4: CIE 1976 $L^*a^*b^*$ Farbenraum*, DIN EN ISO 11664-4:2012.
- [163] J. Falbe, *Römpp Lexikon Chemie*, 10. Auflage. Stuttgart: Thieme Verlag, 1999.
- [164] J. Buddrus und B. Schmidt, *Grundlagen der organischen Chemie*, 4. Auflage. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 2011.
- [165] G. Kickelbick, *Chemie für Ingenieure*, 1. Auflage. München: Pearson Studium, 2008.
- [166] DIN 53170, *Lösemittel für Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Verdunstungszahl.*, DIN 53170:2009.
- [167] H. Vietinghoff, *Ufo Naturwissenschaft Band 201: Die Verdunstung freier*

- Wasserflächen - Grundlagen, Einflußfaktoren und Methoden der Ermittlung*, 1. Auflage. Seddiner See: UFO, Atelier für Gestaltung und Verlag, 2000.
- [168] Siegwirk Switzerland AG, *Verdunstungsgeschwindigkeit von Lösemitteln*. Barga, Schaffhausen, Schweiz, 2008.
- [169] *Prüfen geometrischer Größen: Meßschrauben - Teil 1: Bügelmeßschrauben, Normalausführung - Begriffe, Anforderungen, Prüfung*, DIN 863-1:1999.
- [170] D. Alex et al., *Klein: Einführung in die DIN-Normen*, 14. Auflage. Stuttgart: B.G. Teubner Verlag, 2008.
- [171] *Technische Zeichnungen: Werkstückkanten mit unbestimmter Form - Begriffe und Zeichnungsangaben*, DIN ISO 13715:2000.
- [172] H.-J. Bargel und G. Schulze, *Werkstoffkunde*, 8. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [173] U. Fischer, *Fachkunde Metall*, 53. Auflage. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel Verlag, 1999.
- [174] *Härteprüfung an Kunststoffen und Elastomeren*, VDI/VDE Richtlinie 2616 Blatt 2, 2012.
- [175] *Kunststoffe und Hartgummi: Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Durometer (Shore-Härte)*, DIN EN ISO 868:2003.
- [176] R. Singh, "Some Investigations for Small-Sized Product Fabrication with FDM for Plastic Components," *Rapid Prototyping Journal*, Band 19, Ausgabe 1, S. 58-63, 2013.
- [177] G.W. Ehrenstein, *Polymer Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendung*, 3. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [178] *Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze*, DIN EN ISO 527-1:2012.
- [179] *Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen*, DIN EN ISO 527-2:2012.
- [180] A. Bagsik und V. Schöppner, "Mechanical Properties of Fused Deposition

- Modeling Parts Manufactured with ULTEM*9085," in *ANTEC*, Boston, Massachusetts, USA, 2011.
- [181] M. Bertoldi, M.A. Yardimci, C.M. Pistor, S.I. Gucerı und G. Sala, "Mechanical Characterization of Parts Processed via Fused Deposition," in *Proceedings of the 9th International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, USA, 1998, S. 557-566.
- [182] S. Griessbach, R. Lach und W. Grellmann, "Kleinserienfertigung hochfester Kunststoffbauteile," *Kunststoffe*, Band 2008, Ausgabe 5, S. 29-32, 2008.
- [183] A. Bagsik, V. Schöppner und E. Klemp, "FDM Part Quality Manufactured with Ultem*9085," in *Proceedings of Polymeric Materials 2010*, Halle, 2010.
- [184] B. Lee, J. Abdullah und Z. Khan, "Optimization of Rapid Prototyping Parameters for Production of Flexible ABS Object," *Journal of Materials Processing Technology*, Band 169, Ausgabe 1, S. 54-61, 2005.
- [185] *Dichte: Begriffe, Angaben*, DIN 1306:1984.
- [186] *Kunststoffe – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen – Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren*, DIN EN ISO 1183-1:2013.
- [187] *Kunststoffe – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen – Teil 2: Verfahren mit Dichtegradientensäule*, DIN EN ISO 1183-2:2004.
- [188] *Kunststoffe Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen - Teil 3: Gas-Pyknometer-Verfahren*, DIN EN ISO 1183-3:2000.
- [189] PCE Deutschland GmbH, *Präzisionswaage der Serie PCE-BT*. Meschede, 2011.
- [190] *Zerstörungsfreie Prüfung: Terminologie - Teil 8: Begriffe für die Dichtheitsprüfung*, DIN EN 1330-8:1998.
- [191] W.G. Bley und G. Schröder, "Wie dicht ist dicht? oder: suchst Du noch oder misst Du schon?," in *DGZfP-Jahrestagung 2007: Zerstörungsfreie Prüfung in Forschung, Entwicklung und Anwendung*, Fürth, 2007.

- [192] *Zerstörungsfreie Prüfung: Dichtheitsprüfung - Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und -verfahren*, DIN EN 1779:1999.
- [193] *Vakuumtechnik: Schnellverbindung - Kleinflansch-Verbindungen*, DIN 28 403:1986.
- [194] K. Jousten, *Wutz: Handbuch Vakuumtechnik*, 10. Auflage. Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag, 2010.
- [195] RP-Plating GmbH, *RP-Plating: Bessere Oberflächen auf Rapid Prototyping, Abgüssen und Prototypen*, [Online]. Verfügbar: <http://www.rp-plating.de> [Zugriff am: 01. Mai 2014]
- [196] J. Bohnet, "Leicht zu reinigende Schichten auf lasergesinterten Rapid-Prototyping Bauteilen," *RTEjournal*, Ausgabe 8, 2011.
- [197] robotmech Rapid Prototyping Stössel GmbH, *Metal Coating - Technologie-Update für Ihre Prototypen*. Koblach, Vorarlberg, Österreich, 2009.
- [198] R. Winker, *Electroplating with FDM Masters*. Eden Prairie, Minnesota, USA: Stratasys Inc., 2010.
- [199] O. Baier, G. Witt und M. Busch, "Generative Herstellung von Wachsmodellen auf Trägerplatten und anschließender galvanoplastischer Aufbau zur Herstellung komplexer Innenstrukturen," in *Tagungsband der Rapid.Tech 2011 - Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologien*, Erfurt, 2011.
- [200] H. Gärtner, M. Hoffmann, H. Schaschke und I. Schürmann, *Großes Buch der Chemie*, 1. Auflage. München: Compact Verlag, 2004.
- [201] H. Krauch und W. Kunz, *Reaktionen der anorganischen Chemie*, 6. Auflage. Heidelberg: Hüthig Verlag, 1997.
- [202] IKA Gruppe, *RH basic 2*, [Online]. Verfügbar: http://www.ika.de/owa/ika/catalog.product_detail?iProduct=3339000 [Zugriff am: 5. Februar 2014]
- [203] IKA Gruppe. *RH basic 2*, [Online]. Verfügbar: http://www.ika.de/ika/product_art/manual/ika_rh_basic2_digi_kt_c.pdf [Zugriff am: 5. Februar 2014]
- [204] H. Czichos und K.-H. Habig, *Tribologie-Handbuch*, 3. Auflage. Wiesbaden:

Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

- [205] Stratasys Inc., *Fortus 3D-Produktionssysteme - Real Parts: Für reale Möglichkeiten*. Eden Prairie, Minnesota, USA, 2013.
- [206] Stratasys Inc., *uPrint se 3D Print Pack - Einfaches Drucken von 3D-Modellen direkt an Ihrem Arbeitsplatz*. Eden Prairie, Minnesota, USA, 2013.
- [207] A. Müller, *Einfärben von Kunststoffen*, 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2002.
- [208] G. Lapresa, *Industrielle Kunststoff-Coloristik*, 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 1998.
- [209] H.P. Latscha und H. Klein, *Anorganische Chemie: Chemie-Basiswissen I*, 8. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [210] H. Uetz, *Abrasion und Erosion - Grundlagen, Betriebliche Erfahrungen, Verminderung*, 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 1986.
- [211] S.S. Crump, J.W. Comb, Jr., W.R. Friedman und R.L. Zinniel, "Process of Support Removal for Fused Deposition Modeling," US 5503785, 2. April 1996.
- [212] J.L. Lombardi, D. Popovich und G.J. Artz, "Water Soluble Rapid Prototyping Support and Mold Material," US 6070107, 30. Mai 2000.
- [213] Alphacam GmbH, *Cleanstation UW20 - Reinigungssystem*, [Online]. Verfügbar: <http://www.alphacam.de/3dprinter/dimension/cleanstationuw20> [Zugriff am: 4. Februar 2014]
- [214] H.R. Horton, L.A. Moran, K.G. Scrimgeour, M.D. Perry und J.D. Rawn, *Biochemie*, 4. Auflage. München: Addison-Wesley Verlag, 2008.
- [215] Polymer Chemistry Innovations, Inc., *Aquazol*, [Online]. Verfügbar: <http://www.polychemistry.com/aquazol/> [Zugriff am: 04. Februar 2014]
- [216] Busch, M., Bilder des Hohlleiterteilers, elektronisch zugesendet am 6. März 2014.
- [217] Nathrath, N., Dokumentation der Vermessung der Hohlleiterkomponenten, elektronisch zugesendet am 5. April 2014.

- [218] E. Westkämper, M. Decker und L. Jendoubi, *Einführung in die Organisation der Produktion*, 1. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [219] Heidolph Instruments GmbH & Co. KG, *Intelligent Destillieren*. Schwabach, 2014.
- [220] P. Kurz und N. Stock, *Synthetische Anorganische Chemie - Grundkurs*, 1. Auflage. Berlin: Walter de Gruyter GmbH, 2013.
- [221] D. Gruden, *Umweltschutz in der Automobilindustrie - Motor, Kraftstoff, Recycling*, 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [222] A. Kalweit, C. Paul, S. Peters und R. Wallbaum, *Handbuch für Technisches Produktdesign: Material und Fertigung - Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [223] P. Winkel, *Konstruktionspraxis - Beschichten: Das Potenzial der Galvanotechnik für neue Konstruktionen (Teil 1)*, [Online]. Verfügbar: <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/werkstoffe/oberflaechen/articles/117873/> [Zugriff am: 07. März 2013]
- [224] N. Esswein et al., *Schlussbericht zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die AiF geförderten Forschungsvorhaben 15511N: Entwicklung eines neuen Verfahrens für die kostengünstige Fertigung von Bipolarplatten mit Hilfe galvanogeformter Spritzgusswerkzeuge*. Schwäbisch Gmünd, 2010.
- [225] Metris HQ, *Koordinatenmessgeräte: Portalmessmaschinen - Horizontalarm-messmaschinen - Brückenmessmaschinen*. Leuven, Belgien, 2007.
- [226] *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil1: Begriffe*, DIN EN ISO 10360-1:2003.
- [227] COMSOL Inc., *Comsol - Product Suite*, [Online]. Verfügbar: <http://www.comsol.com/products> [Zugriff am: 03. März 2014]
- [228] E. Ivers-Tiffée und W. von Münch, *Werkstoffe der Elektrotechnik*, 9. Auflage. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, 2004.
- [229] H. Schade und E. Kunz, *Strömungslehre*, 3. Auflage. Berlin: Walter de

- Gruyter GmbH & Co. KG, 2007.
- [230] J. Zierep und K. Bühler, *Grundzüge der Strömungslehre - Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide*, 7. Auflage. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2008.
- [231] T. Wohlers, *Wohlers Report 2009: State of the Industry - Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins, Colorado, USA: Wohlers Associates Inc., 2009.
- [232] O. Baier und G. Witt, "Application Driven Process Chain for the Manufacturing of Fuel Cell Components Consisting of Multi-jet Modeling (MJM), Electroforming and Machining," in *RAPDASA Conference 2012 - Additive Manufacturing in Industry*, Pilansberg National Park, Südafrika, 2012.
- [233] O. Baier und G. Witt, "Functional Components Produced by Multi-Jet Modelling Combined with Electroforming and Machining," *The South African Journal of Industrial Engineering*, Band 25, Ausgabe 2, S. 182-192, 2014.
- [234] J. Hoffmann, "ThermoJet und medizinische Modelle - Ein Erfahrungsbericht," in *Rapromed*, Oelsnitz, 2000.
- [235] L.V. Bui, V. Doan und K. Kwo, "Phase Change Compositions and Methods for Selective Deposition Modeling," EP 1033222, 22. Februar 2002.
- [236] O. Baier und G. Witt, "Electroplating of AM Wax Models for the Production of Internal Structures," in *Annals of DAAAM 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, Wien, Österreich, 2011, S. 1163-1164.
- [237] K.-H. Grote und J. Feldhusen, *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, 22. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [238] *Fertigungsverfahren Reinigen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, DIN 8592:2003.
- [239] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 5. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [240] 3D Systems Inc. *Thermo Jet 88 Sicherheitsdatenblatt*, [Online]. Verfügbar: http://www.3dsystems.ru/global/files/materials/tj88/88MSDS_Ger.PDF [Zugriff am: 17. Februar 2014]

8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

8.1 Abbildungen

Bild 2-1: Prozesskette der additiven Fertigung	3
Bild 2-2: Umsätze von Anlagen, Material und Service (in Mio. Dollar) [2]	6
Bild 2-3: Treppenstufeneffekt und Definition des Neigungswinkels [11]	8
Bild 2-4: Theoretische Rauheit des Treppenstufeneffektes	9
Bild 2-5: Verfahrensprinzip des FLM mit getrenntem Bau- und Supportmaterial.....	10
Bild 2-6: Darstellung der unterschiedlichen Bauteilfüllungen	15
Bild 2-7: Verfahrensprinzip der Galvanik (in Anlehnung an [96])	16
Bild 2-8: Darstellung von Stromlinien- bzw. Stromdichteverteilung [96] [102]	18
Bild 3-1: Probekörper (a) und Einsatz zur Bestimmung der Einwirkzeit (b)	35
Bild 3-2: Vorgehensweise zur Ermittlung der Einwirkzeit.....	35
Bild 3-3: Auswirkung ungeeigneter Chemikalien	37
Bild 3-4: Einwirkzeit für 4-Methyl-2-pentanon	39
Bild 3-5: Einwirkzeit für Aceton	40
Bild 3-6: Einwirkzeit für Chlorbenzol	41
Bild 3-7: Einwirkzeit für Ethylacetat.....	41
Bild 3-8: Einwirkzeit für Ethylmethyleketon	42
Bild 3-9: Einwirkzeit für m-Xylol	42
Bild 3-10: Einwirkzeit für Toluol.....	43
Bild 3-11: Mittelwerte der optimierten Einwirkzeiten	43
Bild 3-12: Auswirkung geeigneter Chemikalien bei optimierter Einwirkzeit	44
Bild 3-13: Probekörper und Messrichtungen für die Rauheitsmessungen.....	46
Bild 3-14: Mittelwerte der arithmetischen Mittenrauwerte Ra	47
Bild 3-15: Mittelwerte der gemittelten Rautiefe Rz.....	48
Bild 3-16: Verbesserungsfaktoren der unterschiedlichen Orientierungen.....	49
Bild 3-17: Detailansicht der 60° Flächen.....	50
Bild 3-18: Übersicht der Versuche zur Farbbeständigkeit.....	52
Bild 3-19: Darstellung der Farbunterschiede, Teil 1	53

Bild 3-20: Darstellung der Farbunterschiede, Teil 2.....	54
Bild 3-21: Ablagerungen an Bauteilen	56
Bild 3-22: Verdunstung von Gemischen	58
Bild 3-23: Unbehandelte Pyramide	58
Bild 3-24: Maßabweichungen in der x-y-Ebene	59
Bild 3-25: Unbehandelte Treppe	60
Bild 3-26: Maßabweichungen in z-Richtung	61
Bild 3-27: Maß der Abtragung [171].....	62
Bild 3-28: Auswirkung auf das Maß der Abtragung	63
Bild 3-29: Kantenverrundung in x-y-Ansicht.....	63
Bild 3-30: Probekörper zur Feststellung von Formabweichungen	64
Bild 3-31: Auswirkung auf einen Durchbruch.....	64
Bild 3-32: Auswirkung auf einen kreisförmigen Durchbruch	65
Bild 3-33: Auswirkung auf Stege.....	65
Bild 3-34: Auswirkung auf Zylinder	66
Bild 3-35: Prüfkörper zur Bestimmung der Härte	68
Bild 3-36: Shore D Härte der ersten Messreihe	68
Bild 3-37: Härtedifferenz zum unbehandelten Bauteil der ersten Messreihe.....	69
Bild 3-38: Shore D Härte der zweiten Messreihe.....	69
Bild 3-39: Härtedifferenz zum unbehandelten Bauteil der zweiten Messreihe.....	70
Bild 3-40: Typische Spannungs-Dehnungskurven von Kunststoffen [178] [177]	71
Bild 3-41: Verwendete Zugprobe nach DIN EN ISO 527-2 [179].....	72
Bild 3-42: Orientierung der Zugproben im Bauraum	73
Bild 3-43: Zugprobenübersicht normiert auf unbehandelte Proben	74
Bild 3-44: Vergleich der Dehnungswerte	75
Bild 3-45: Vergleich der Spannungswerte.....	76
Bild 3-46: Vergleich des Zugmoduls	77
Bild 3-47: Übersicht der REM-Aufnahmen.....	78
Bild 3-48: Gewicht und Volumen bei 1 cm ³	80
Bild 3-49: Gewicht und Volumen bei 8 cm ³	80

Bild 3-50: Dichte bei 1 und 8 cm ³	81
Bild 3-51: Vorrichtung zur Bestimmung der Gasdichtheit	82
Bild 4-1: Prozesskette indirekter Prozesse nach VDI 3404 [7]	85
Bild 4-2: Statische Auflöseversuche	86
Bild 4-3: Magnetrührer RH basic 2 der Firma IKA [202]	87
Bild 4-4: Versuch zum Bewegungseinfluss.....	87
Bild 4-5: Einfluss der Bewegung des Lösemittels	88
Bild 4-6: Einfluss der Acetontemperatur	89
Bild 4-7: Einfluss des A/V-Verhältnisses	90
Bild 4-8: Zusammenfassung der Einflussfaktoren	91
Bild 4-9: Darstellung der Versuche zum Farbeinfluss.....	92
Bild 4-10: Probekörper für die Versuche zum Farbeinfluss	93
Bild 4-11: Einfluss von Farbstoffen auf die Auflösegeschwindigkeit	94
Bild 4-12: Einfluss der Nachbehandlung auf die Auflösegeschwindigkeit.....	95
Bild 4-13: Prozentuale Verlängerung der Auflösezeiten	96
Bild 4-14: Ra der ABS- und Kupferflächen	98
Bild 4-15: Rz der ABS- und Kupferflächen.....	99
Bild 4-16: Herstellung eines Hohlleiterteilers (a, c aus [216]; e, d aus [217])	102
Bild 4-17: Innengeometrie des Hohlleiterkerns	103
Bild 4-18: Eingesetzter Rotationsverdampfer der Firma Heidolph [219] [220].....	104
Bild 4-19: ABS Rückstände nach Destillation [216]	105
Bild 5-1: Grundprinzip von FLM-Galvanikblenden	106
Bild 5-2: Entformungsproblem unbehandelter Blenden	107
Bild 5-3: Durchwachsen der galvanischen Abscheidung	108
Bild 5-4: Mögliche Fehlstellen beim Einsatz von Blenden	109
Bild 5-5: Messaufbau zur Überprüfung der Abscheidungshöhe	110
Bild 5-6: Vergleich der galvanischen Fehlstellen mit der Simulation	111
Bild 5-7: Blende zur Konzentration der Stromdichte in Randbereichen.....	112
Bild 5-8: Grundlegende Strömungsprinzipien [229]	113
Bild 5-9: Mögliche Strömungsbilder	113

Bild 5-10: Simulation der Stromdichteverteilung durch Elektrolytverarmung	114
Bild 5-11: Abscheidung bei voller Anströmung	115
Bild 5-12: Blende mit Lochgitter zur Konvektionsunterdrückung	116
Bild 5-13: Verfahrensprinzip des MJM [234]	118
Bild 5-14: Darstellung der Verfahrenskombination	119
Bild 5-15: Anpassung des MJM an den Anwendungsfall.....	120
Bild 5-16: Haftungsproblematik der Wachsmodele auf Kupferplatten.....	121
Bild 5-17: Ausreichende Haftung durch Wärmever- und -nachbehandlung.....	122
Bild 5-18: Leitende und nicht leitende Wachsstrukturen nach der Galvanisierung..	123
Bild 5-19: Galvanisierter Wärmetauscher ohne Aktivierung	124
Bild 5-20: Vorgehen der verzögerten Aktivierung	124
Bild 5-21: Blenden für Wärmetauscher und Reformer	125
Bild 5-22: Anpassung des Querschnittes.....	126
Bild 5-23: Unterschiedliche Wärmetauschergeometrien [233].....	126
Bild 5-24: Zwischenstufen der Wärmetauscherherstellung [233].....	127
Bild 5-25: Aufbau des Reformersmoduls	128
Bild 5-26: Herstellung des Reformersmoduls	129
Bild 5-27: Zweiseitiges Modell	129

8.2 Tabellen

Tabelle 3-1: Vorgehensweise zur Qualitätsbetrachtung	27
Tabelle 3-2: Ausgewählte Chemikalien und deren Einordnung	33
Tabelle 3-3: Optische Bewertung der Reaktion	36
Tabelle 3-4: Messbedingungen für Rauheitsmessungen (Auszug) [157] [159]	38
Tabelle 3-5: Vergleich der Löslichkeitsparameter.....	45
Tabelle 3-6: Durchschnittliche Rauheit der unbehandelten Probekörper	46
Tabelle 3-7: Bewertung der Farbdifferenz [161]	55
Tabelle 3-8: Verdunstungszahlen relevanter Medien	57
Tabelle 4-1: Ergebnisse der statischen Auflöseversuche	86
Tabelle 4-2: Einfluss der Ordnungszahl auf den Auflösevorgang.....	95

Tabelle 4-3: Material- und Zeitverbrauch unterschiedlicher Würfel	100
Tabelle 9-1: Behandlungsmittelauswahl, Teil 1	159
Tabelle 9-2: Behandlungsmittelauswahl, Teil 2	160
Tabelle 9-3: Behandlungsmittelauswahl, Teil 3	161

9 Anhang

Tabelle 9-1: Behandlungsmittelauswahl, Teil 1

Nr.	Behandlungs- mittel	Auswir- kungen	Risiko-Sätze & "Risikozahl"		Auswahlkriterien		
					geringe Gefahr	Löslich- keit	Für Behandlung geeignet?
			Σ	1225			
1	Aceton	X			20	Ja	Ja
2	Acetophenon	X			30	Ja	Bedingt geeignet
3	Allylkohol	X			135	Nein	Nein
4	Amylacetat (n-)	X	5		5	Ja	Ja
5	Amylmercaptan	X			0	Ja	Bedingt geeignet
6	Amylzimtsäurealdehyd	X			0	Ja	Bedingt geeignet
7	Anilin	X	N		250	Nein	Nein
8	Aromaten	X	N		0	Ja	Bedingt geeignet
9	Benzaldehyd	X	N		10	Ja	Bedingt geeignet
10	Benzol / Benzol-Gemisch	X	N		130	Nein	Nein
11	Benzoesäureethylester	X	O		40	Ja	Bedingt geeignet
12	Benzol	X	X		240	Nein	Nein
13	Benzylalkohol	X	O		30	Ja	Bedingt geeignet
14	Brom (flüssig)	X	N		70	Ja	Bedingt geeignet
15	Buttersäure	X	O		30	Ja	Bedingt geeignet
16	Butylacetat	X	O		5	Ja	Bedingt geeignet
17	Chlor (flüssig)	X	N		100	Nein	Nein
18	Chlorbenzol	X	X		25	Ja	Ja
19	Chloroform	X	X		200	Nein	Nein
20	Chlorsulfonsäure	X	O		70	Ja	Bedingt geeignet
21	Cyclohexan	X	N		10	Ja	Bedingt geeignet
22	Cyclohexanon	X	N		25	Ja	Bedingt geeignet
23	Decaline	X	X		70	Ja	Ja
24	Diäctonalkohol	X	O		60	Ja	Bedingt geeignet
25	Dichlorbenzol	X	O		50	Ja	Bedingt geeignet
26	Diethylether	X	X		30	Ja	Ja
27	Dimethylformamid	X	X		160	Nein	Nein
28	Dioxan	X	X		135	Nein	Nein
29	Diphenylamin	X	O		50	Ja	Bedingt geeignet
30	Diphenylether	X	O		60	Ja	Bedingt geeignet
31	Essigsäure	X	N		5	Ja	Bedingt geeignet
32	Essigsäureamylester	X	O		60	Ja	Bedingt geeignet
33	Essigsäurebenzylester	X	O		25	Ja	Bedingt geeignet
34	Essigsäurebutylester	X	O		10	Ja	Bedingt geeignet
35	Essigsäureethylester	X	O		10	Ja	Bedingt geeignet
		X: positiv N: negativ O: keine Angabe				Bedingt geeignet	Ja
						Bedingt geeignet	Nein

Tabelle 9-2: Behandlungsmittelauswahl, Teil 2

Nr.	Behandlungs- mittel	Auswir- kungen	Risiko-Sätze & "Risikozahl"										Auswahlkriterien		
			Löslich- keit		Keine Beständigkeit		Σ	1225	50	10	10	10	50	10	Für Behandlung geeignet?
36	Essigsäureisopropylester	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	50	10	Bedingt geeignet
37	Essigsäuremethylester	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	50	10	Bedingt geeignet
38	Ethylacetat	X	X	X	X	X	10	10	10	10	10	10	50	10	Ja
39	Ethylbenzol	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	30	10	Bedingt geeignet
40	Ethylchlorid	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	125	10	Nein
41	Ethylchlorid	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	180	10	Nein
42	Freon 12	X	N	X	X	X	10	10	10	10	10	10	10	10	Bedingt geeignet
43	Frigen / Freon 21	X	N	X	X	X	10	10	10	10	10	10	10	10	Bedingt geeignet
44	Frigen / Freon 22	X	N	X	X	X	10	10	10	10	10	10	10	10	Bedingt geeignet
45	Furfural / Furfural	X	N	X	X	X	10	10	10	10	10	10	30	10	Bedingt geeignet
46	Heptan	X	N	X	X	X	10	10	10	10	10	10	10	10	Bedingt geeignet
47	Keton	X	N	X	X	X	10	10	10	10	10	10	0	10	Bedingt geeignet
48	Kresolösung	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	60	10	Bedingt geeignet
49	Methanol	X	N	X	X	X	10	10	10	10	10	10	40	10	Bedingt geeignet
50	Mesityloxid	X	O	X	X	X	5	10	10	10	10	10	55	10	Bedingt geeignet
51	Methylchlorid	X	O	X	X	X	15	10	10	10	10	10	135	10	Nein
52	Methylchlorbromid	X	O	X	X	X	20	10	10	10	10	10	90	10	Bedingt geeignet
53	Methylchlorid	X	N	X	X	X	20	10	10	10	10	10	70	10	Bedingt geeignet
54	Methylethylketon	X	X	X	X	X	10	10	10	10	10	10	50	10	Ja
55	Methylisobutylketon	X	X	X	X	X	10	10	10	10	10	10	80	10	Ja
56	Methylisopropylketon	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	50	10	Bedingt geeignet
57	Methylpropylketon	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	80	10	Bedingt geeignet
58	Nitrobenzol	X	X	X	X	X	15	10	10	10	10	10	320	10	Nein
59	Normalbenzin	X	N	X	X	X	15	10	10	10	10	10	305	10	Nein
60	Oximefurfural	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	60	10	Bedingt geeignet
61	Perchloräthylen	X	X	X	X	X	10	10	10	10	10	10	90	10	Ja
62	Petrolether	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	170	10	Nein
63	Petroläum	X	N	X	X	X	10	10	10	10	10	10	10	10	Bedingt geeignet
64	Phenol	X	N	X	X	X	10	10	10	10	10	10	60	10	Bedingt geeignet
65	Phenylethylalkohol	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	70	10	Bedingt geeignet
66	Phthalsäuredibutylester	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	220	10	Nein
67	Phthalsäurediethylester	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	60	10	Bedingt geeignet
68	Phthalsäuredimethylester	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	0	10	Bedingt geeignet
69	Phthalsäuremonoamylester	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	0	10	Bedingt geeignet
70	Propylendichlorid	X	O	X	X	X	10	10	10	10	10	10	40	10	Bedingt geeignet
		X: positiv											Ja		
		N: negativ											Bedingt geeignet		
		O: keine Angabe											Nein		

Tabelle 9-3: Behandlungsmittelauswahl, Teil 3

Nr.	Behandlungs- mittel	Auswirl- kungen		Risiko-Sätze & "Risikozahl"		Auswahlkriterien		
						geringe Gefahr	Löslich- keit	Für Behandlung geeignet?
				Σ	1225	5	Nein	Bedingt geeignet
71	Propylenglycolmethylether	X	O			310	Nein	Nein
72	Propylenoxid	X	O			60	Ja	Bedingt geeignet
73	Pyridin	X	O			60	Ja	Bedingt geeignet
74	Salicylsäuremethylester	X	O			45	Ja	Bedingt geeignet
75	Salpetersäure	X	O			320	Nein	Nein
76	Schwefelkohlenstoff	X	X			40	Ja	Bedingt geeignet
77	Schwefelsäure	X	N			0	Ja	Bedingt geeignet
78	Sebacinsäuredibutylester	X	O			60	Ja	Bedingt geeignet
79	Tetrachlorethan	X	O			240	Nein	Nein
80	Tetrachlorkohlenstoff	X	X			65	Ja	Bedingt geeignet
81	Tetrahydrofuran	X	O			0	Ja	Bedingt geeignet
82	Tetrahydrofurfurylalkohol	X	O			75	Ja	Bedingt geeignet
83	Tetralin	X	O			90	Ja	Bedingt geeignet
84	Thionylchlorid	X	O			40	Ja	Bedingt geeignet
85	Thiophen	X	O			40	Ja	Bedingt geeignet
86	Thymol	X	O			40	Ja	Bedingt geeignet
87	Titantetrachlorid	X	O			30	Ja	Ja
88	Toluol	X	X			60	Ja	Bedingt geeignet
89	Trichlorbenzol	X	O			30	Ja	Bedingt geeignet
90	Trichlorethan	X	O			100	Nein	Nein
91	Trichlorethylen	X	X			150	Nein	Nein
92	Trichlorphenol	X	O			0	Ja	Bedingt geeignet
93	Triglycolacetat	X	O			170	Nein	Nein
94	Trikresylphosphat	X	O			65	Ja	Ja
95	Xylol	X	X			40	Ja	Bedingt geeignet
96	Zimtaldehyd	X	O			60	Ja	Bedingt geeignet
97	Zinn-IV-Chlorid	X	O					Ja
								Bedingt geeignet
								Nein

X: positiv
N: negativ
O: keine
Angabe

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.